

T.C. İSTANBUL KÜLTÜR ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

METRO TÜNELİ- ZEMİN-TEMEL ETKİLEŞİMİNDE

ÖĞE RİJİTLİKLERİNİN ROLÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

NEŞE KOCA

1309211006

Anabilim Dalı: İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

Programı: GEOTEKNİK

TEMMUZ, 2017

T.C. İSTANBUL KÜLTÜR ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

METRO TÜNELİ- ZEMİN-TEMEL ETKİLEŞİMİNDE

ÖĞE RİJİTLİKLERİNİN ROLÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

NEŞE KOCA

1309211006

Anabilim Dalı: İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

Programı: GEOTEKNİK

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 27 Temmuz 2017

Tezin Savunulduğu Tarih: 27 Temmuz 2017

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Ersin Arel

Diğer Jüri Üyeleri: Prof.Dr. Akın Önalp
Doç Dr. Sadık Öztoprak

TEMMUZ, 2017

ÖNSÖZ

İstanbul Kültür Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Geoteknik programında yürütülmüş olan yüksek lisans tezi'nin konusu metro tüneli-zemin-temel etkileşiminde öge rijitliklerinin rolüdür.

Lisans eğitiminden bugüne bilgi birikimi ile yol gösteren sayın Prof. Dr. Akın Önalp'e, yüksek lisans eğitimim süresince desteğini esirgemeyen danışman hocam Yrd. Doç. Dr. Ersin Arel'e teşekkür ederim.

Tez çalışmamda bana destek sağlamış olan İnş. Yük. Müh. İlhan Burak Duran'a da teşekkür ederim.

Son olarak bugüne kadar her zaman arkamda olan aileme, sevgili arkadaşım Maral Sağbazar'a ve emeği geçen tüm yakınlarıma teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

1. GİRİŞ.....	1
1.1. Tezin Amacı.....	1
1.2. Önceki Çalışmalar.....	1
2. TÜNELLER.....	4
2.1. Tünelcilik Tarihi.....	4
2.2. Tünel Terimleri.....	4
3. TÜNEL AÇMA YÖNTEMLERİ.....	6
3.1. Alman Yöntemi.....	7
3.2. Eski Avusturya Yöntemi.....	8
3.3. Belçika Yöntemi.....	9
3.4. Yeni Avusturya Yöntemi ile Tünel Açma (NATM).....	10
3.5. TBM ile Tünel Açma Yöntemi.....	15
4. TÜNEL KAZILARININ ETKİSİ İLE YÜZEYDE OLUŞAN OTURMALARIN BULUNMASI.....	18
5. SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ.....	22
5.1. Sonlu Elemanlar Yazılımı-PLAXIS.....	22
6. HASSASLIK ANALİZİ VE PARAMETRE DEĞİŞİMİ.....	28
6.1. Hassaslık Analizi.....	28
7. TÜNELLERİN MODELLENMESİ.....	30
8. SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE YAPILAN TEMEL-METRO TÜNELİ ETKİLEŞİM ANALİZLERİ.....	32

8.1. Durum 1-Önce Bina Sonra Tünellerin İnşa Edildiği Durum-Tünel Kumda....	36
8.2. Durum 2-Önce Tünel Sonra Binanın İnşa Edildiği Durum-Tünel Kilde.....	43
8.3. Durum 3-Önce Tünel Sonra Binanın İnşa Edildiği Durum-Tünel Kumda.....	50
8.4. Durum 4-Önce Bina Sonra Tünellerin İnşa Edildiği Durum-Tünel Kumda....	56
9. YÜKSEK MODÜLLÜ KOLONLAR- JET GROUT YÖNTEMİ.....	63
10. ANALİZ SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ.....	66
11. SONUÇLAR.....	71
12. KAYNAKÇA.....	73

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1 İstanbul mevcut ve planlanan metro güzergah haritası.....	4
Şekil 2.2 Tünel genel görünümü	5
Şekil 3.1 Zemin dane boyutuna göre kullanılan makine tipi (Mori vd, 1995)	7
Şekil 3.2 Alman yöntemi.....	8
Şekil 3.3 Eski Avusturya yöntemi.....	9
Şekil 3.4 Belçika yöntemi.....	10
Şekil 3.5 Mekanik süreçler ve meydana gelen gerilemeler nedeniyle tünel boşluğunda birbiri ardına oluşan yenilmeler (Rabcewicz, 1965).....	13
Şekil 3.6 NATM Tüneli için önerilen tipik ana kesit geometrisi (Rabcewicz, 1965).....	14
Şekil 3.7 NATM Tüneli için önerilen bir kazı sıralaması.....	14
Şekil 3.8 Türkiye’de TBM’nin ilk kez kullanılması.....	16
Şekil 3.9 TBM genel görünüşü.....	16
Şekil 4.1 Yüzey oturma ve hacim kaybı eğrisi (Arioğlu, 2002).....	21
Şekil 4.2 Sığ tünellerde meydana gelen deformasyon şekilleri ve gösterimi(Whittle, 2003).....	21
Şekil 5.1 a) Düzlem deformasyon b) Eksenel simetri (Brinkgreve v.d. 2017).....	23
Şekil 5.2 Üçgen elemanların düğüm ve gerilme noktaları (Brinkgreve v.d., 2017)..	24
Şekil 5.3 Drenajlı üç eksenli basınç deneyinde hiperbolik gerilme şekil değiştirme grafiği (Brinkgreve v.d. 2017)	25
Şekil 5.4 Ödometre deneyinden E_{ocd} değerinin bulunması (Brinkgreve v.d. 2017)..	26
Şekil 6.1 Hassaslık matrisi (Brinkgreve v.d. 2017).....	29
Şekil 6.2 Toplam bağıl hassaslık (Brinkgreve v.d. 2017).....	29
Şekil 7.1 Tünelin modellenmesi.....	30
Şekil 7.2 Plaka elemanının boyutları (Brinkgreve v.d. 2017).....	31

Şekil 8.1 Yapı ve tünellerin Konumu.....	32
Şekil 8.2 Modele ait Geometri.....	33
Şekil 8.3 Modele ait sonlu eleman ağı.....	33
Şekil 8.4 Deforme olmuş sonlu eleman ağı (Durum 1).....	37
Şekil 8.5 Toplam düşey deformasyon ($u_y=0.06753m$) (Durum 1).....	37
Şekil 8.6 Temelde oluşan toplam düşey deformasyon ($u_y=0.0628m$) (Durum 1).....	38
Şekil 8.7 Parametrelerin minimum ve maksimum değerleri.....	38
Şekil 8.8 Hassaslık analizi kombinasyonları.....	39
Şekil 8.9 Parametrelerin hassaslık derecesi değerleri.....	39
Şekil 8.10 Parametre analizinde yapılan analiz kombinasyonları	40
Şekil 8.11 Minimum parametre değerleri ile parametre analizinde elde edilen düşey deplasman değerleri (Durum 1).....	40
Şekil 8.12 Minimum değerler ile parametre analizinde elde edilen temelde oluşan düşey deplasman değerleri	41
Şekil 8.13 Maksimum değerler ile parametre analizinde elde edilen düşey deplasman değerleri (Durum 1).....	41
Şekil 8.14 Maksimum değerler ile parametre analizinde elde edilen temelde oluşan düşey deplasman değerleri (Durum 1).....	42
Şekil 8.15 Deforme olmuş sonlu eleman ağı (Durum 2).....	45
Şekil 8.16 Modelde oluşan toplam düşey deformasyon ($u_y=0.0218m$).....	45
Şekil 8.17 Tünel kaplamasında oluşan toplam düşey deformasyon ($u_y=0.007m$) (Durum 2).....	46
Şekil 8.18 Parametrelerin hassaslık derecesi değerleri.....	46
Şekil 8.19 Parametre analizinde yapılan analiz kombinasyonları	47
Şekil 8.20 Minimum parametre değerleri ile parametre analizinde elde edilen düşey deplasman değerleri (Durum 2).....	47
Şekil 8.21 Minimum parametre değerleri ile parametre analizinde elde edilen tünel kaplamasında oluşan düşey deplasman değerleri (Durum 2).....	48

Şekil 8.22 Maksimum parametre değerleri ile parametre analizinde elde edilen düşey deplasman değerleri (Durum 2).....	48
Şekil 8.23 Maksimum parametre değerleri ile parametre analizinde elde edilen tünel kaplamasında oluşan düşey deplasman değerleri (Durum 2).....	49
Şekil 8.24 Deforme olmuş sonlu eleman ağı (Durum 3)	51
Şekil 8.25 Modelde oluşan toplam düşey deformasyon ($u_y=0.06249m$) (Durum 3). 51	
Şekil 8.26 Temelde oluşan toplam düşey deformasyon ($u_y=0.096m$) (Durum 3).....	52
Şekil 8.27 Parametrelerin Hassaslık Derecesi Değerleri.....	52
Şekil 8.28 Parametre Analizinde Yapılan Analiz Kombinasyonları.....	53
Şekil 8.29 Minimum parametre değerleri ile parametre analizinde elde edilen düşey deplasman değerleri (Durum 3).....	53
Şekil 8.30 Minimum parametre değerleri ile parametre analizinde elde edilen temelde oluşan düşey deplasman değerleri (Durum 3).....	54
Şekil 8.31 Maksimum parametre değerleri ile parametre analizinde elde edilen düşey deplasman değerleri (Durum 3)	54
Şekil 8.32 Minimum parametre değerleri ile parametre analizinde elde edilen temelde oluşan düşey deplasman değerleri (Durum 3).....	55
Şekil 8.33 Deforme olmuş sonlu eleman ağı (Durum 4).....	57
Şekil 8.34 Modelde oluşan toplam düşey deformasyon ($u_y=0.016m$) (Durum 4).....	57
Şekil 8.35 Tünelde oluşan toplam düşey deformasyon ($u_y=0.0078m$) (Durum 4)....	58
Şekil 8.36 Parametrelerin Hassaslık Derecesi Değerleri.....	58
Şekil 8.37 Parametre Analizinde Yapılan Analiz Kombinasyonları	59
Şekil 8.38 Parametre analizinde kullanılan minimum parametre değerleri ile elde edilen düşey deplasman değerleri (Durum 4).....	59
Şekil 8.39 Parametre analizinde kullanılan minimum parametre değerleri ile elde edilen tünel kaplamasında oluşan düşey deplasman değerleri (Durum 4).....	60
Şekil 8.40 Parametre analizinde kullanılan maksimum parametre değerleri ile elde edilen düşey deplasman değerleri (Durum 4).....	60

Şekil 8.41 Parametre analizinde kullanılan maksimum parametre değerleri ile elde edilen tünel kaplamasında oluşan düşey deplasman değerleri (Durum 4).....	61
Şekil 9.1 Jet grout yöntemi ile iyileştirme sonrası zemin taşıma kapasitesindeki değişim (Melegary-Garasino, 1991).....	63
Şekil 9.2 Deforme olmuş sonlu eleman ağı (Jet-Grout ile iyileştirilmiş zemin).....	64
Şekil 9.3 Modelde oluşan toplam düşey deformasyon ($u_y=0.036m$) (Jet-Grout ile iyileştirilmiş zemin).....	65
Şekil 9.4 Temelde oluşan toplam düşey deformasyon ($u_y=0.03677m$) (Jet-Grout ile iyileştirilmiş zemin)	65
Şekil 10.1 Gömme derinliğinin etkisi (Durum 1 ve Durum 3).....	67
Şekil 10.2 Gömme derinliğinin etkisi (Durum 2 ve Durum 4).....	68
Şekil 10.3 Bina yükünün etkisi (Durum 1 ve Durum 3).....	69
Şekil 10.4 Bina yükünün etkisi (Durum 2 ve Durum 4).....	69
Şekil 10.5 Örtü kalınlığının etkisi (Durum 1 ve Durum 3).....	70
Şekil 10.6 Örtü kalınlığının etkisi (Durum 2 ve Durum 4).....	70

TABLULAR LİSTESİ

Tablo 4.1 Bina hasar sınıflandırması.....	20
Tablo 8.1 Referans zemin parametreleri değerleri.....	35
Tablo 8.2 Tünel kaplaması malzeme özelliği.....	35
Tablo 8.3 Temel gömme gerinliği (D_f)'in değiştirilmesi ile temelde oluşan düşey deplasmanlar (Durum 1).....	42
Tablo 8.4 Bina yükü (q)'nün değiştirilmesi ile temelde oluşan düşey deplasmanlar (Durum 1).....	43
Tablo 8.5 Tünel derinliğinin değiştirilmesi ile temelde oluşan düşey deplasmanlar (Durum 1).....	43
Tablo 8.6 Gömme derinliği (D_f)'in değiştirilmesi ile tünel kaplamasında oluşan düşey deplasmanlar (Durum 2).....	49
Tablo 8.7 Bina yükü (q)'nün değiştirilmesi ile tünel kaplamasında oluşan düşey deplasmanlar (Durum 2).....	50
Tablo 8.8 Tünel derinliğinin değiştirilmesi ile tünel kaplamasında oluşan düşey deplasmanlar (Durum 2).....	50
Tablo 8.9 Gömme derinliği (D_f)'in değiştirilmesi ile temelde oluşan düşey deplasmanlar (Durum 3).....	55
Tablo 8.10 Bina yükü (q)'nün değiştirilmesi ile temelde oluşan düşey deplasmanlar (Durum 3).....	56
Tablo 8.11 Tünel derinliğinin değiştirilmesi ile temelde oluşan düşey deplasmanlar (Durum 3).....	56
Tablo 8.12 Gömme derinliği (D_f)'in değiştirilmesi ile tünel kaplamasında oluşan düşey deplasmanlar (Durum 4).....	61
Tablo 8.13 Bina yükünün (q) değiştirilmesi ile tünel kaplamasında oluşan düşey deplasmanlar (Durum 4).....	62
Tablo 8.14 Tünel derinliğinin değiştirilmesi ile tünel kaplamasında oluşan düşey deplasmanlar (Durum 4).....	62
Tablo 9.1 Referans Zemin Parametreleri Değerleri.....	64

SİMGELER LİSTESİ

S	: Teorik oturma
S_{max}	: Maksimum oturma
x	: Tünel ekseninden enine mesafe
i	: Eğri büküm noktası
z_0	: Tünel derinliği
D	: Eşdeğer tünel kazı çapı
ρ	: Doğal birim hacim ağırlığı
E	: Elastisite modülü
P_s	: Toplam taban basıncı
η_{sr}	: Hassaslık oranı
η_{ss}	: Hassaslık sayısı
V_k	: Hacim kaybı
i	: Tünel merkezine olan uzaklık
q_a	: Kayma dayanımının asimptotik değeri
q_f	: Göçme anındaki deviatör gerilme değeri

KISALTMALAR LİSTESİ

NATM : *New Australian Tunneling Method*-Yeni Avusturya Tünel Açma Metodu

TBM : *Tunnel Boring Machine*-Tünel Delme Makinesi (köstebek)

EPB-TBM : *Earth Pressure Balance* TBM- Pasa Basıncılı TBM



Enstitüsü	:	Fen Bilimleri
Anabilim Dalı	:	İnşaat Mühendisliği
Programı	:	Geoteknik
Tez Danışmanı	:	Yrd. Doç. Ersin Arel
Tez Türü ve Tarihi	:	Yüksek lisans – Haziran 2017

ÖZET

METRO TÜNELİ- ZEMİN-TEMEL ETKİLEŞİMİNDE ÖĞE RİJİTLİKLERİNİN ROLÜ

Büyük şehirlerde artan nüfus yoğunluğu, beraberinde birçok sorunu getirmektedir. Bunların başında ulaşım sorunu gelmektedir. Günümüzde, ulaşım sorununun en etkili çözümü ise raylı ulaşım sistemleridir. Dünyada en yaygın kullanılan raylı sistem ise metro sistemleridir. Metro sistemleri, mevcut yapılaşmanın olduğu alanlarda trafiğin yeraltına taşınabilmesi nedeniyle tercih edilmektedir. Ancak yapılacak olan tünel kazıları beraberinde sorunlar da getirmektedir. Tünel kazılarının, mevcut durumda bulunan yapılarda oluşturabileceği hasarın önlenmesi için tünel içinde ve yüzeyde oluşturacağı deformasyonların limit değerler içinde kalması son derece önemlidir.

Bu çalışmada; sonlu eleman yönteminin kullanımıyla TBM ile açılan tünel kazısının, mevcut durumda olan bina temelinde oluşturduğu deformasyonlar, tünel hattı üzerinde inşa edilecek olan binaların tünelde oluşturduğu deformasyonlara etki eden parametrelerin hassaslık analizi yardımıyla bulunması hedeflenmiştir. Sistem özelliklerinin değiştirilmesiyle en olumsuz koşullar irdelenmiştir. Modeller sonlu elemanlar yazılımı ile oluşturulup, analizleri gerçekleştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Tünel, TBM, deformasyon, hassaslık analizi, parametre analizi.

Institute : **Applied Science**
Department : **Civil Engineering**
Programme : **Geotechnical**
Supervisor : **Yrd. Doç. Ersin Arel**
Degree Awarded and Date : **MS– June 2017**

ABSTRACT

THE ROLE OF ITEMS METRO TUNNEL-SOIL-FOUNDATION INTERACTION

Increasing population in the big cities creates municipal problems such as transportation problems and traffic congestion. Underground rail transport has been accepted as the best solution to these problems. Subways are the most common urban railway system around the world which transfer the traffic under the existing settlement. On the other hand, it is known that excavation for tunnels can create many problems during construction. In order to prevent the damage to the existing structures, deformation of the surface and of the tunnels should be within acceptable limits.

The software Plaxis using the finite element method has been employed in this study to analyse the interaction of tunnel with the soil and the structure above. Sensitivity analysis has been performed to find the most sensitive parameter for the deformation of TBM tunnel and surface settlements.

Keywords: Tunnel, TBM, deformation, sensitivity analysis, parameter variation, settlement.

1. GİRİŞ

1.1. Tezin Amacı

Bu çalışmada; metro tünel kazısı esnasında kazı hattında mevcut bulunan bir yapıda ve metro tüneli hattı üzerinde inşa edilecek olan yapı nedeniyle, temel ve temelden zemine etkileyen taban basıncı sonlu elemanlar ile modellenmiştir. Gerçekleştirilen analizlerde metro tüneli-yapı temeli etkileşiminde zemin parametrelerinin ve sistem öğelerinin tünelde, zemin yüzeyinde oluşan deformasyonlara olan etkisinin bulunması amaçlanmıştır.

1.2. Önceki Çalışmalar

Tünellerin yapımı sırasında değişen ortam koşulları nedeniyle yatay ve düşey deformasyonlar oluşur. Bu deformasyonların büyüklüğünün ve şeklinin bilinmesi, tünel çevresinde mevcut durumda olan yapılarda oluşturabileceği potansiyel hasarı önlemek için son derece önemlidir. Bu amaçla metro tünel kazısının, yüzeyde oluşturduğu oturmaların ve kazı güzergahında bulunan yapılara olan etkisinin belirlenebilmesi için geçmişten günümüze bir çok araştırma yapılmıştır.

Tünel kazısı nedeniyle yüzeyde oluşan oturmaları normal dağılım eğrisi ile tanımlanmıştır.. Bu eğri ile oturmaların zeminin türüne (kil veya kum), tünel boyutlarına ve tünelin konumuna bağlı olduğu bulunur.[1].

Farklı geometrik şekillere sahip (elips, oval, dikdörtgen, vb.) yeraltı açıklık şekillerinin ve genişlik/yükseklik oranının etkisi irdelenmiştir. Ortamdaki asal gerilmelerin açıklığa göre, düşey, yatay ve eksenel doğrultuda etki ettiği varsayımında bulunulur.. Her bir asal birincil gerilmenin sırasıyla en büyük, ortanca ve en küçük değerler aldığı, birbirine eşdeğer altı farklı birincil gerilme kombinasyonu için sayısal gerilme çözümlerini sonlu elemanlar programı ile yapılmıştır Tünel geometrisi değişkeni olarak 2 parametre seçilmiştir. Bunlar:

- Kesit şekilleri (elips, oval, kemer tavanlı, dikdörtgen)
- Genişlik/Yükseklik oranıdır.

Yapılan analizler sonucunda, dikdörtgen kesitli açıklıkların duraylılığı en olumsuz sonuca sahip açıklıklar olduğu elde edilmiştir. Bunun nedeni, düz kenarlarda yenilme bölgelerinin geniş olmasıdır. Kemer tavanlı ve düz tabanlı kesitler genellikle elips ya da oval kesitlere göre duraylılığı daha zayıf kesitlerdir. En uygun açıklık genişlik/yükseklik=1 olduğu durumdur^[2].

İnşa edilecek olan tünelin ağırlığı, kazılan zeminin ağırlığından daha az olacaktır. Sistemde oluşacak olan bu fark, deformasyonlara sebep olacak ve gerilmeleri etkileyecektir. Yumuşak zeminlerde yapılan tünel kazısı sırasında oluşan kaldırma etkisi sebebiyle oluşan deformasyonlar incelenmiştir. TBM (*tunnel boring machine*) kullanarak yapılacak olan silindirik bir tünel ele alarak farklı tünel kesitleri ile analizler gerçekleştirilmiştir. Zeminin homojen, izotrop lineer elastik malzeme olarak kabul edildiği analizin sonucunda tünel, kazılan zeminden ne kadar hafif ise, yüzeyde oluşacak olan deformasyonların o kadar az olacağı sonucuna ulaşılmıştır^[3]

TBM ile yumuşak zeminlerde yapılan PLAXIS 2D kullanarak modellenen kazıda hassaslık analizi gerçekleştirilmiştir. Analizde Western Scheldt (Hollanda) tüneli verileri kullanılmıştır. Hassaslık analizi (*sensitivity analysis*) tekniği karmaşık mühendislik problemlerinde hangi girdi (*input*) parametrelerinin modelde önemli rol oynadığını bulmak için geliştirilmiştir^[4].

İzin verilebilir oturmalar, cadde ve sokaklarda 2cm, yapılarda 1cm olarak belirtilmiştir. Bu limit değerler göz önünde bulundurularak Tahran'da yapımı planlanan metro tüneli inşası sırasında oluşabilecek olan yüzey oturmaları, analitik yöntemler ve sonlu eleman programı (PLAXIS) aracılığı ile hesaplanmıştır. Her iki yöntemde de zemin parametreleri drenajsız durumu temsil edecek şekilde seçilmiştir. Analitik yöntemler ve sonlu eleman yöntemiyle elde edilen oturmalar karşılaştırılmıştır. Bulunan bu değerler izin verilebilir oturmaların üzerinde olması nedeniyle zemin iyileştirmeleri yapılması önerilmiştir^[5].

Gelişen bilgisayar yazılımları karmaşık geoteknik problemlerini basite indirgeyerek gerçekçi modellerin oluşturulmasına olanak sağlasa da zemin parametrelerinin doğru tanımlanamaması analiz sonuçlarının yanlış olmasına yol açmaktadır. Bu nedenle zemin özelliklerindeki değişimin deplasmanlara olan etkisinin bulunabilmesi için "Hassaslık Analizi" ve "Parametre Değişimi" analizleri yapılmaktadır. Plaxis

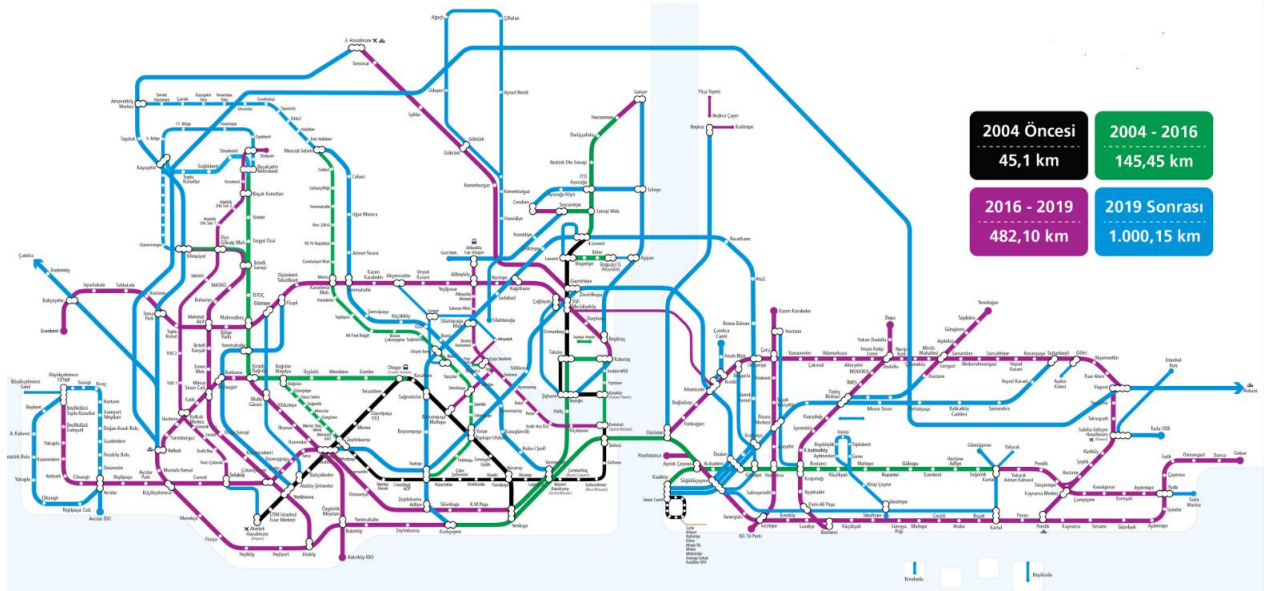
yazılımı ile sayısal çözümlerde zemin özelliklerindeki değişimin sonuçlara olan etkisini irdelemiştir. Çalışmada kil ve kumdan meydana gelen iki tabakalı bir zemin profili Mohr-Coulomb malzeme modeli ile oluşturulmuştur. Temele ise yapı yükü etki ettirilmiştir. Referans zemin özellikleri ile gerçekleştirilen analizin ardından zeminin kohezyonu, elastisite modülü ve kayma direnci açısı özellikleri için minimum ve maksimum değerler girilmiştir. Kullanılan sonlu eleman programında yer alan “Hassaslık Analizi” ve “Parametre Değişimi” analizleri ile temelin oturma davranışına etkileyen zemin parametreleri bulunmuştur. Yapılan analizler ile kilde kohezyon değerinin, kumda ise kayma direnci açısının bağlı hassaslık değerinin en yüksek olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Yapılan hassaslık analizinin ardından parametre analizleri gerçekleştirilmiştir. Temelin altında oluşacak olan maksimum ve minimum oturma değerleri bulunmuştur[6].

2. TÜNELLER

2.1. Tünelcilik Tarihi

Dünya’da kalıntıları bulunmuş olan en eski tünel M.Ö 4000 yıllarında Babil yakınlarında yer almaktadır. Ancak faaliyetini hala sürdüren, ulaşım amacıyla açılmış en eski tünel 1863 yılında hizmete girmiş olan Londra Tüneli’dir. Dünya’nın en eski ikinci ulaşım amacıyla açılmış olan tüneli ise Karaköy-Beyoğlu hattında yer alan tüneldir. Günümüzde Türkiye’de en çok raylı sistem hattına sahip olan İstanbul’da 2016 itibariyle 145.45 km uzunluğunda metro tüneli hat uzunluğuna ulaşılmıştır.

2019 yılında ise bu değer 482.10 km olması hedeflenmektedir(Şekil 2-1)[7]. Şanghay metrosu ise dünyanın en uzun hattı olup, 355km uzunluğa sahiptir.

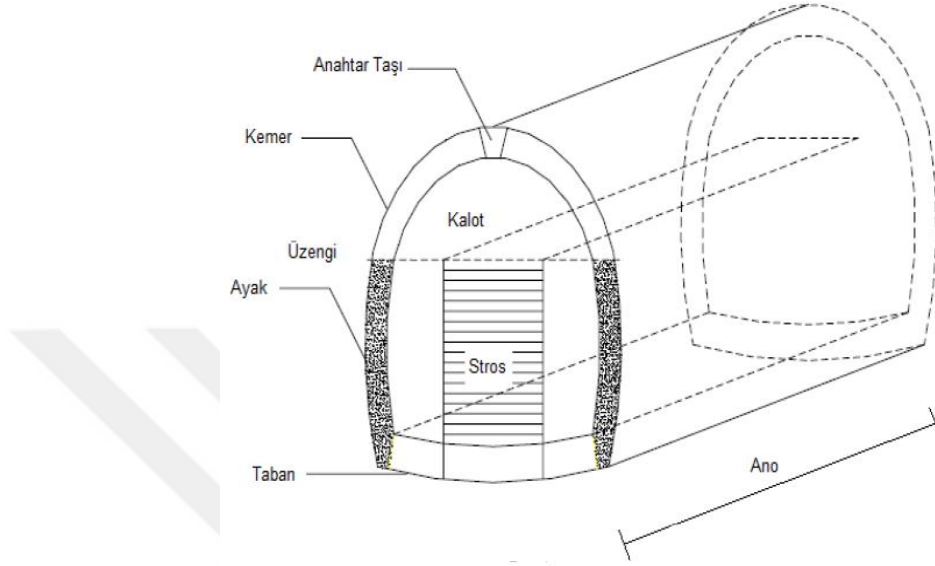


Şekil 2.1 İstanbul mevcut ve planlanan metro güzergah haritası

2.2. Tünel Terimleri

Topoğrafik nedenlerle yapılaşmaların bulunduğu alanlarda yer üstünden sağlanamayan ulaşım hattının yer altından yapılabilmesi amacıyla zemin içerisinde yapılan iki ucu açık kazılara *tünel* denir. Bir tarafı açık olan tünellere *galeri*, tünel içerisinde dik olarak yapılan kazılara *baca* veya *şaft* denilmektedir. Şekil 2.2’de tipik tünel en kesiti verilmiştir. Tünellerde işlemlerin yapıldığı parçaya *ano* denmektedir. Ano uzunluğu tünel açma yöntemine bağlı olarak 1.5m ile 9m arasındadır. Tünellerin

üstünde bulunan zemine *örtü*, bu zemin tabakasının kalınlığı ise *örtü kalınlığı* olarak adlandırılmaktadır. Tünel hattının altını oluşturan kısma *taban* veya *radye*, tünel yan duvarlara *ayak* veya *duvar*, tünelin üstünü oluşturan kısma *kemer* adı verilmektedir. Kemer ile ayağın birleşim noktası *üzengi* denir. Üzengi tüneli iki kısma ayırır. Üzenginin üstünde yer alan kısım *kalot*, altında yer alan kısım ise *stros*'tur.



Şekil 2.2 Tünel genel görünümü

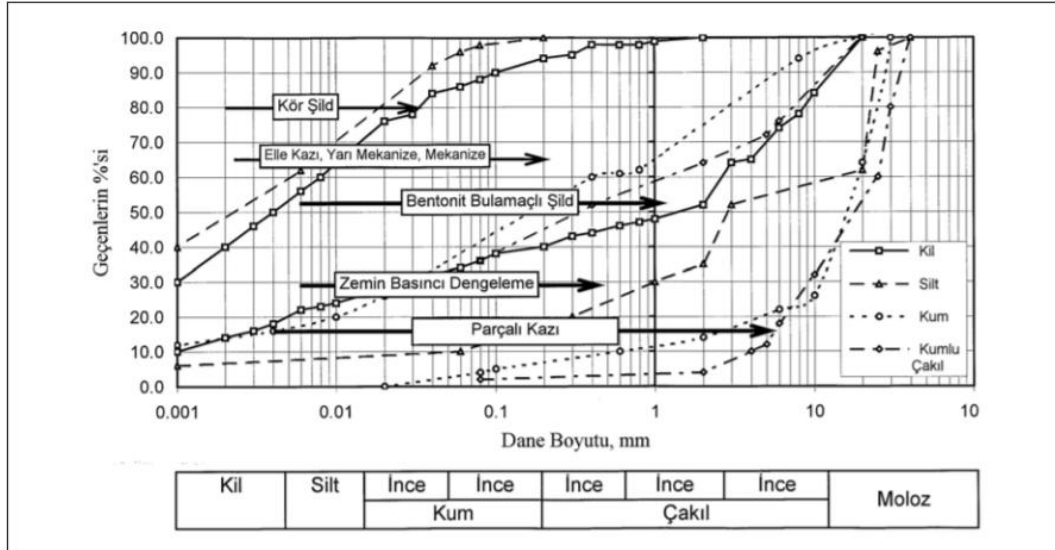
3. TÜNEL AÇMA YÖNTEMLERİ

Tarihin ilk tünelleri, insan gücüne dayalı kazılarla ve ahşap iksa elemanları ile açılırken tünel yapılarına olan ihtiyacın gün geçtikçe artması farklı tekniklerin geliştirilmesini sağlamıştır. 50 yıl öncesine kadar tünel kazıları aç-kapa kazılarla yapılabilirken, bu yöntem artık şehir içerisinde uygulanabilirliğini yitirmiştir. Bu nedenle üst ve alt yapı sistemlerini görece daha az etkilemesi nedeniyle en yaygın olarak uygulanan metodlar tünel delme makinesi ile (TBM) yürütülen Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemidir (NATM). En uygun tünel açma yönteminin seçilebilmesi tünel kazısının yapılacağı zemin profilinin özelliklerinin doğru tayini ile mümkün olmaktadır.

Alman tünencilik komitesi (DAUB: *Deutsche Ausschuss für Unterirdisches Bauen*) ve Fransız tünencilik komitesi (AFTES: *L'Association Française des Tunnels et de l'Escape Souterrain*) kazıya etki eden zemin parametreleri olarak:

- Zeminin dane boyutu
- Kohezyon değeri
- Kıvam Limitleri
- Geçirimsizlik katsayısı
- Zeminin mineralojik yapısına bağlı olduğunu belirtmişlerdir.

Tünel kazı yönteminin belirlenebilmesi için zemin dane boyutu ile ilişkili bir sınıflama sistemi oluşturmuştur (Şekil 3.1)^[8].



Şekil 3.1 Zemin dane boyutuna göre kullanılan makine tipi (Mori vd, 1995)

XIX.Yüzyılda tünel açma metodları geliştirildikleri ülke isimleri ile bağdaştırılmıştır. Bu yöntemlerin başında Alman, Eski Avusturya, Belçika yöntemleri gelmektedir. Yöntemlerde, tünel kazılarını küçük ara kademelere ayırıp, geçici destek sistemi olarak ahşaplar ve kalıcı tünel kaplaması için taş duvarlı kemer kullanılmıştır[9].

3.1. Alman Yöntemi

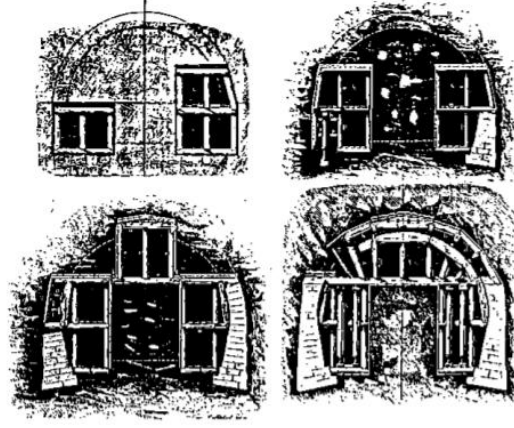
Alman yöntemi aynı zamanda “çekirdek yöntem” olarak da anılmaktadır. Bu yöntem her ne kadar hali hazırda önemini kaybetmiş olsa da en kesidi büyük olan tünel yapıları için kalot kazılarında kullanılmaktadır. Öncelikli olarak tünel inşasında yan ayaklar ve tavan galerileri, daha sonra ise duvarlar imal edilir. Ardından yan ayak galerilerinden, tavan galerine ilerleyerek tünel kesiti birleştirilir. Çekirdek (orta kısmına) yerleştirilmiş olunan destekler deformasyonların oluşmasını engeller. Tavan yapısı örülünce üstüne kaplaması yapılır. En son çekirdek bölüm de kazılarak taban kaplaması yapılır. Böylece tünel inşası tamamlanır (Şekil 3.2).

Avantajları:

- Tünel tavanı kısa sürede sağlamlaştırılması
- Kazının sürekliliğinin olması
- Duraylılığın sağlanması

Dezavantajları:

- Tünel kaplamalarının bir an önce imal edilmesinin gerekmesi
- Dar bir alanda çalışılması



Şekil 3.2 Alman yöntemi

3.2. Eski Avusturya Yöntemi

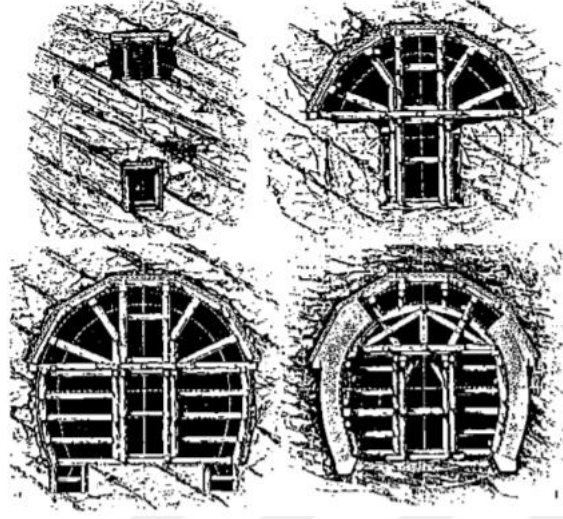
Tünel hattının kısa, en kesitinin geniş olduğu tünellerde tercih edilen bir yöntemdir. Bu yöntemde öncelikli olarak tavan ve tabanda yer alan galerilerinin açılması gerekmektedir. Tavan ve taban galerileri 50-60m'de bacalar ile birleştirilir. Bu galeriler nakliye amacı ile kullanılır. Kazı, yukarıdan aşağı yöne doğru yapılır. Tünel kaplaması ise aşağıdan yukarıya yapılır (Şekil 3.3).

Avantajlar:

- Çalışma alanının geniş olması
- Ekonomik ve hızlı olması
- Her zemin tipine uygulanabilir olması

Dezavantajlar:

- Taban kaplamasının gecikmesi, geçici destek sisteminin pahalı olmasına sebebiyet vermesi. Bu durum ayrıca zemin dayanımının azalmasına da neden olur.



Şekil 3.3 Eski Avusturya yöntemi

3.3. Belçika Yöntemi

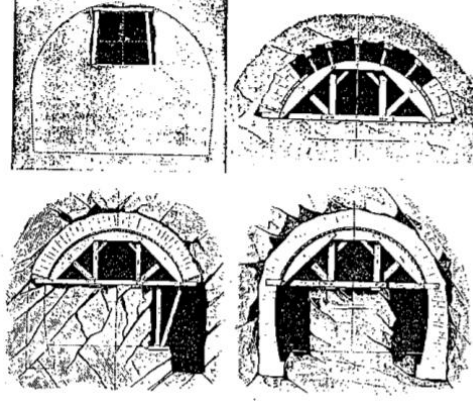
Belçika yönteminin ana prensip tavan stabilitesinin korunmasıdır. Bu nedenle ilk olarak tavan galerisi oluşturulmakta, kazı ardından hemen kaplamasının yapılması gerekmektedir. Tavanın tamamlanmasının ardından diğer kısımlar da açılarak kazıları yapılır. Yöntemde, zeminin dayanımına ve tünel enkesitinin büyüklüğüne bağlı olarak değişiklikler adapte edilebilmektedir. Büyük basınçlar altında tünel gövdesinin yanında bacalar imal edilir. Bu bacalara beton dökülür. Eski Avusturya yöntemi gibi bu yöntemde de tavan ve taban galerileri bir baca ile birleştirilir, nakliyat galerisi ile bağlantı oluşturulur. Sağlamlık derecesi orta ve az olan kaya ortamlarda Belçika yöntemi başarıya ulaşmaktadır (Şekil 3.4).

Avantajlar:

- Tünel tavanının kısa zamanda sağlamlaştırılıp tamamlanması
- Kazı sürekliliğinin olması

Dezavantajlar:

- Tavan ve taban kaplamasının bir an önce tamamlanmasının gerekmesi
- Çalışmaların dar bir alanda yapılması



Şekil 3.4 Belçika yöntemi

3.4. Yeni Avusturya Yöntemi ile Tünel Açma (NATM)

1962 yılında Rabcewicz tarafından geliştirilen Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi (*New Austrian Tunneling Method-NATM*), şehir içerisinde ilk olarak 1969 yılında Frankfurt'ta yumuşak zeminde uygulanmıştır ve hala geçerliliğini koruyan bir yöntemdir.

NATM, en uygun kazı yöntemi ile beraber seçilen destek sistemi kazının ardından oluşan ikincil gerilmeler ve deformasyonların, tünel çevresinde yer alan profilin stabilitesinin bozulmasını engelleyecek şekilde seçilmesine ve sistemin kendi dengesini sağlaması prensibine dayanmaktadır.

Rabcewicz (1964)'in tanımına göre NATM; ince püskürtme beton kaplamasından oluşan bu yeni yöntemde, mümkün olan en erken anda “yardımcı kemer (*auxiliary arch*)” yerleştirilerek bir denge sağlanana kadar deformasyonlara izin verilecektir. Tünel çevresinde oluşan basınç düşürülmesi sayesinde son destek sistemi daha az yük alacaktır. Sonrasında daha ince yapı halinde son destekleme sistemi yerleştirilebilecektir.

Bu tanımlama NATM'in 3 ana ögesini vurgulamaktadır. Bunlar:

- 1) İnce püskürtme beton uygulaması
- 2) Halkanın en kısa sürede yerleştirme işlemi
- 3) Tünelde meydana gelen deplasmanların ölçülmesidir.

Ancak daha sonra yer altında bir boşluk yaratılması ve boşluğun stabilitesinin sağlanması için kaya veya zemin ortamının kendi kendini taşıma kapasitesini maksimuma ulaştırmak amacıyla eldeki tüm olanakların kullanılması olarak NATM'ı tanımlanmıştır. Bir başka tanım ise; NATM, bir tüneli çevreleyen kaya ve zemin oluşumlarının, halka şekilli bir destekleme yapısı bütünlüğü içerisinde birleştirildiği yöntemdir. Böylece bu oluşumlar kendi başlarına bu destekleme yapısının bir parçası olacaklardır.

NATM'ın farklı tanımlarının olması, projelerde değişik şekillerde uygulanabilmesidir. Her ne kadar farklı şekillerde tanımlansa da Müller'e göre değişmeyen prensipleri vardır. Hatta NATM bir tünel inşa/açma yöntemi olarak değil, tünel kazı yöntemi olarak tanımlanmalıdır. Müller (1990) NATM'ın prensipleri;

1. Tüneli çevreleyen zemin yükü taşıyan ana bileşendir. Ana bileşenin taşıma kapasitesi, dayanımı, maksimum seviyeye getirilmeli, bu değer profile zarar vermeden muhafaza edilmelidir.
2. 1. maddede bahsi geçen profil dayanımının maksimum seviyeye getirilmesi için deformasyonların kontrollü gelişmesi gerekmektedir. Destek elemanları ile aşırı deformasyon oluşumunun önüne geçilmelidir.
3. Deformasyonlar destek elemanları ve ince bir püskürtme beton tabakası sayesinde önlenebilir. Fakat uygulanan destek elemanları deformasyon sırasında tünel çevresinde yer alan zemin ile temas etmelidir. Bu destek elemanları tünel ile birlikte deformasyona uğrayabilmelidir.
4. Destek elemanları ve püskürtme betonun ilk yerleştirilmeleri sırasında geçen zaman deformasyonların kontrolünde önemlidir. Zamanlama zeminin ve tünelin özelliğine bağlı olarak değişiklik gösterir.

5. İlk olarak yerleştirilen destek elemanları, sistemde uygulanacak olan tüm destek elemanlarını temsil edebilmelidir. Uygulaması yapılacak olan son destek elemanının boyutlandırılması, tünelde uygulanmış olan daha önceki destek elemanlarında oluşmuş olan gerilmeler ve deformasyonlara bağlı olarak yapılmalıdır.

6. Tünel kazısı esnasında destek elemanının henüz uygulanmamış olan kısmın olabildiğince küçük olması gerekmektedir.

7. Tünel tasarımının yapımında ve tünel imalatı sırasındaki tüm çalışmalarda projede yer alan tüm birimler (proje birimi, kontrol birimi v.b.) iletişim içerisinde olmalı ve beraber çalışmalıdır.

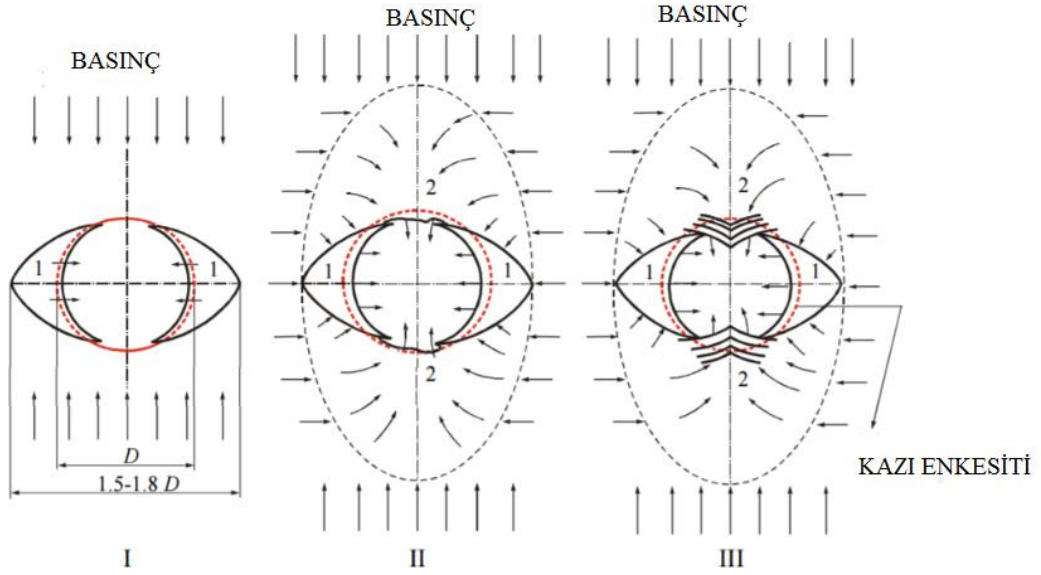
8. Tünel inşası için gerekli olan destek sisteminin projelendirilmesi tünel güzergâhında yer alan birimin jeolojik özelliklerine bağlıdır. Gerekli destek elemanının türü ve miktarı jeolojik birimin sınıflanmasının ardından belirlenir.

Rabcewicz (1965), tünel açıldığında gerilmelerin 3 aşamada gerçekleştiğini söylemiştir (şekil 3.5);

I) Tünelin kama şeklindeki iki yanı Mohr kayma düzleminde kopar ve tünel boşluğuna doğru hareket eder.

II) Açıklığın artmasıyla tünelin üst ve alt kısmı birbirine doğru yakınsanır.

III) Tünel tacında oluşun deplasmanın artmasıyla boşluğa doğru hareket eden zemin artar, sabit yanal toprak basınçları altında göçme meydana gelir. Bu aşamada meydana gelen basınçlara “sıkıştırma basınçları (*squeezing pressures*)” denir.



Şekil 3.5 Mekanik süreçler ve meydana gelen gerilemeler nedeniyle tünel boşluğunda birbiri ardına oluşan yenilmeler (Rabcewicz, 1965)

Açıklıklarda meydana gelen kesme yenilmeleri nedeniyle Rabcewicz, NATM'da kazıların tam kesitte kazı yerine kazıların bölge bölge gerçekleştirilmesi gerektiği sonucuna ulaşmıştır.

NATM'ın kendine has bir şekli olup, geleneksel dairesel kesitli tünellerden farklıdır. Şekil 3.6'da gösterilen Roma rakamları kazı ve destek elemanlarının sırasını temsil etmektedir. İlk olarak tünelin üst kısmı kazılır (I), tüneli desteklemek için orta kısmın kazısı daha sonraya bırakılır. Ardından, yüzey püskürtme beton ile kaplanır (II), üst kısımda bırakılmış olan kazı tamamlanır (III). Sağ ve sol duvar kazıları yapılır (IV). (V). adım ise püskürtme betonun uygulanması ve ek betonarme elemanların imalatının yapılmasıdır. Ardından tünel orta kısmının kazısı ile kazı tamamlanır (VI). Son olarak tünel alt kısmı beton (VII), su geçirmez membran (VIII) ve iç astarın uygulanması ile tamamlanır^[10].

Avantajları:

- Her zemin profilinde uygulanabilir.
- Sabit bir enkesiti yoktur. Bu nedenle esnek uygulamalar yapılabilir. Özellikle metro tünellerinde istasyonlar ve ara geçiş tünelleri gibi değişen kesitler için adaptasyonu kolaylıkla sağlanabilir.
- Yüzeye yakın tünellerde, yüzey oturmalarının (tasmanların) minimum düzeyde kalması.
- Uygulamanın boyutlandırılmasında ekonomiklik sağlanabilir.

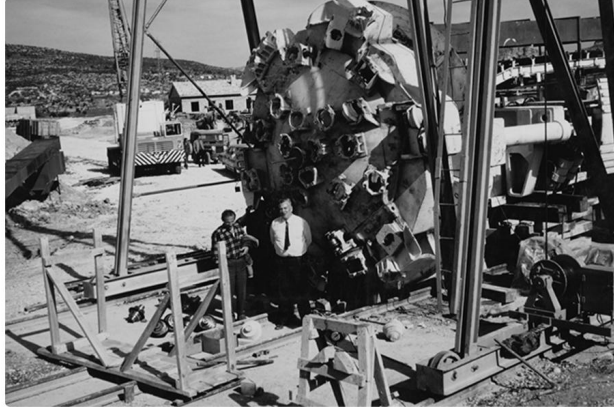
Dezavantajları:

- Tünelde oluşan deplasman değerlerinin daha sık ölçülmesi gerekmektedir.
- Yeraltı suyu bulunan ortamlarda uygulanabilmesi için deplasman ölçümlerine ek ölçümlerin yapılması gerekecektir.
- Ano uzunluklarının kısa olması nedeniyle tünelin ilerleyişi, mekanik açma yöntemlerine göre uzun sürede gerçekleşmektedir.
- Kullanılan malzeme kalitesinin standardının sağlanması zordur.

3.5. TBM ile Tünel Açma Yöntemi

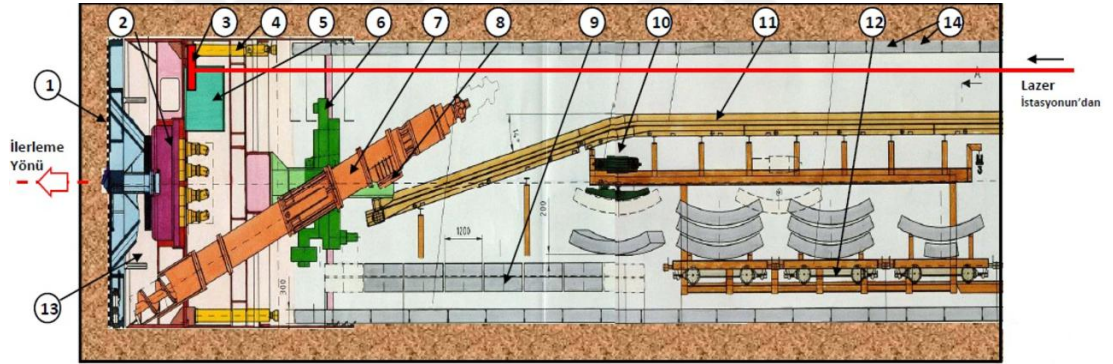
Tünel kazılarının makinalar yardımı ile yapılması dünyada ilk olarak 1856 yılında Amerika'da yer alan Hoosac tüneline gerçekleştirilmiştir. Bu tüneline kazısında kullanılmış olan dairesel bir enkesite sahip keskiner ile kazıda ilerleyen makina TBM kavramının ilk adımıdır.

1956 yılında Robbins, keskiner yerine diskler yardımı ile kazı modeli oluşturmuştur. Tasarladığı makina bir gün içerisinde yaklaşık 40m'lik kazı gerçekleştirmiştir. Başarısı, TBM teknolojisinin ilerlemesini sağlamıştır^[11]. Yöntem Türkiye'de TBM ilk olarak Kadıncık II HES projesinde kullanılmıştır (Şekil 3.8) ^[12].



Şekil 3.8 Türkiye’de TBM’nin ilk kez kullanılması

Son yıllarda TBM’ler yaygınlaşmıştır. Özellikle yerleşim alanlarında, mevcut yapılara ve deplasmanlarına olan etkisinin diğer yöntemlere oranla daha az olması nedeniyle tercih sebebi olmaktadır. Ancak bu yöntemle açılan kazılar yüksek maliyetlidir. TBM’i oluşturan kısımlar Şekil 3.9’da verilmiştir [13].



- 1) Kesici kafa 2) Motor 3) Hedef panosu 4) İtici silindir 5)Hava kilidi 6) Montaj aparatı 7) Vidalı konveyör 8) Vidalı konveyör kapağı 9) Segment besleme ünitesi 10) Segment vinci 11) Konveyör 12) Taşıma dekovili 13) Basınçlı bölüm 14) Monte edilmiş segmanlar

Şekil 3.9 TBM genel görünüşü

TBM’ler kazının gerçekleşeceği zemin profiline göre sınıflandırılmaktadır. Sert zemin ile yumuşak zeminde kullanılması gereken TBM’ler arasında yapısal farklılıklar vardır.

Zeminlerde kullanılan TBM’ler:

1) Basınçlı Tünel Açma Makineleri (*EPB*):

EPB makineleri ilk olarak 1960'da Japonya'da uygulanmıştır. Yeraltı su seviyesinin altında bulunan tünel kazıları esnasında zeminler stabilitesini kaybedeceklerdir. Kısa süre için bile kendisini tutamayan zeminlerin kazısında EPB makineleri ile kazı tercih edilir. EPB'lerin temel prensibi kazılan zeminin kesici kafa haznesini doldurması ve tüm yüzeyin desteklenmesidir.

2) Çamur Basınçlı Tünel Açma Makineleri (*Slurry Shield*):

Çamur basınçlı makineler, akıcı zemin formasyonlarının tünel güzergahında yer alması durumunda tercih edilmektedir. Çamur olarak genellikle bentonit kullanılmaktadır. Ayna ile kesme kafası arasında kalan boşluğa çamur pompalanmaktadır. Bu çamur, aynadan sıyrılarak kazılan zemin ile karışır. Karışan bu malzeme de bir pompa yardımıyla tünel güzergahından dışarıya pompalanmaktadır.

4. TÜNEL KAZILARININ ETKİSİ İLE YÜZEYDE OLUŞAN OTURMALARIN BULUNMASI

Tünel kazısı yapıldığında yüzeyde oturmalar meydana gelmektedir. Yüzeyde oluşan oturmaların başlıca iki nedeni vardır: Bunlar, yeraltı suyu ve zemin kaybıdır.

1) Yeraltı Suyu

Yeraltı suyu seviyesindeki değişiklik; zemin içerisinde kazısı yapılmış olan tünel, bir drenaj kanalı etkisi yaratmakta ve yer altı suyu seviyesini değiştirmektedir. Yeraltı suyu seviyesindeki bu değişiklik efektif gerilme değerlerinin artmasına neden olmaktadır. Efektif gerilmelerdeki bu artış kohezyonlu birimlerde oturmayı meydana getirmektedir.

2) Zemin Kaybı

Tünel kazısı nedeniyle tünel çevresinde oluşan zemin kaybı (hacim kaybı) yüzeye etki etmektedir. Zemin kaybı, zeminin mekanik özelliklerine, tünel geometrisine (tünel çapı, derinlik) bağlıdır.

Peck ve Schmidt (1969) tünel kazısına bağlı olarak yüzeyde oluşan oturmaların normal dağılım eğrisine uygun olduğunu söylemiştir. Buna uygun olarak Gauss modelini geliştirmişlerdir. Oturmaların tahmini için geliştirilmiş olan amprik yöntemler bazı kabuller yapmaktadır [14]. Bunlar:

- Tünel en kesiti daireseldir,
- Tünel yüzeye yakındır,
- Tünel, kil birim içerisinde yer almaktadır,
- Yapılan oturma tahminleri, ilk destek için geçerlidir,
- Tünel, NATM yöntemi ile açılmaktadır,
- Konsolidasyon oturmaları ihmal edilmiştir.

$$S = S_{\max} \times e^{\left(\frac{-x^2}{2t^2}\right)} \quad (\text{O'Reilly,1982}) \dots\dots\dots(4.1)$$

$$i = \frac{i_1 + i_2 + i_3}{3} \dots\dots\dots (4.2)$$

$$i_1 = 0.386 \times Z_0 + 2.84 \text{ (Arioğlu,1992)} \dots\dots\dots (4.2a)$$

$$i_2 = 0.5 \times Z_0 \text{ (Glassop, 1978)} \dots\dots\dots (4.2b)$$

$$i_3 = 1.392 \left(\frac{D}{2} \right) \left(\frac{Z_0}{D} \right)^{0.704} \text{ (Arioğlu,1992)} \dots\dots\dots (4.2c)$$

$$S_{\max} = 0.785 \times (\rho \times Z_0 + P_s) \left(\frac{D^2}{i \times E} \right) \text{ (Herzog,1985)} \dots\dots\dots (4.3)$$

$$d_s / d_x = 0.606 \times (S_{\max} / i) \text{ (O'Reilley, 1982)} \dots\dots\dots (4.4)$$

$$d_s^2 / d_x^2 = 0.445 \times (S_{\max} / i) \text{ (O'Reilley, 1982)} \dots\dots\dots (4.5)$$

$$\varepsilon_1 = 0.445 \times \left(\frac{S_{\max}}{Z_0} \right) \text{ (O'Reilley, 1982)} \dots\dots\dots (4.6)$$

$$\varepsilon_c = 0.445 \times \left(\frac{S_{\max}}{i^2} \right) \text{ (O'Reilley, 1982)} \dots\dots\dots (4.7)$$

$$H_{\max} = i \times \sqrt{3} \text{ (O'Reilley, 1982)} \dots\dots\dots (4.8)$$

Burada;

S: Teorik oturma (Gauss hata fonksiyonu, normal dağılım eğrisi)

S_{max}: Maksimum oturma (mm)

x:Tünel ekseninden enine mesafe (m)

i=Eğri büküm noktası(m)

z₀=Tünel derinliği(m)

D=Eşdeğer tünel kazı çapı (m)

ρ = Doğal birim hacim ağırlığı (t/m³)

E= Elastisite modülü (t/m²)

P_s =Toplam sürşarj yükü (t/m²)

d_s/d_x =Maksimum eğim

d^2_s/d^2_x =Maksimum sarkma eğrisi

ϵ_t =Maksimum yatay deformasyon (çekme) (m)

ϵ_c =Maksimum yatay deformasyon (basma) (m)

Denklem (4.2) ve denklem (4.3) NATM tünel kazılarında elde edilen veriler ile oluşturulmuştur^[15]. Teorik yüzey oturmalarının hesaplanması için geliştirilmiş olan denklemler (denklem 4.4, 4.5, 4.6, 4.7, 4.8), denklem (4.1)'den yola çıkılarak türetilmiştir. Tünel kazısı nedeniyle oluşacak olan yüzey oturmalarının mevcut yapılara olan hasar sınıflaması Tablo 4-1'de verilmiştir^[16]. Tabloda yer alan d_s/d_x oturma meydanına getirdiği eğrinin eğimidir. Şekil 4.1'de yüzey oturma eğrisi verilmiştir. Şekil 4.2'de ise sığ tünellerde meydana gelen deformasyonlar gösterilmiştir.

Tablo 4.1 Bina hasar sınıflandırması (Attewell,1986)

d_s/d_x	S_{max} (mm)	Hasar
<0.002	<10	İhmal
0.002–0.005	10–50	Hafif
0.005–0.02	50–75	Orta
>0.02	>75	Yüksek

5. SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ

Sonlu elemanlar, kısmi diferansiyel denklemler yardımıyla karmaşık elastisite problemlerinin çözümünde kullanılan sayısal analiz yöntemidir. Diferansiyel denklemler çözüm bölgesinde farklı noktalarda elde edilen büyüklükleri içeren cebirsel denklem takımlarına dönüştürülerek yaklaşık olarak ifade edilir^[17].

Yazılım mühendisliğinin ilerlemesi, bu yöntem ile analiz yapan sonlu eleman programlarının geliştirilmesine olanak sağlamıştır. Bu programlar, günümüzde mühendislik problemlerinin çözülmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak zemin mekaniği problemleri için son yıllarda kullanılmaya başlanmıştır.

5.1. Sonlu Elemanlar Yazılımı-PLAXIS

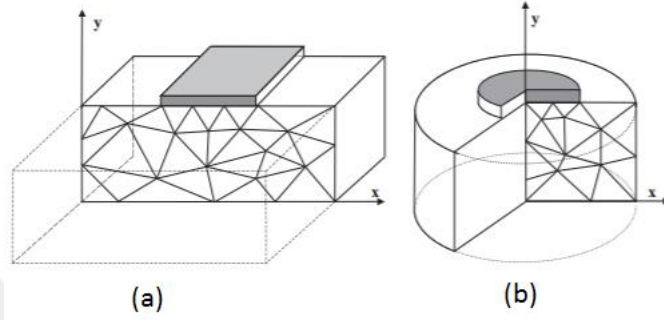
Plaxis (*Finite Element for Soil and Rock Analysis*), sistemlerde oluşan deformasyon ve şevlerin stabilitesini sonlu elemanlar yöntemi ile analiz edebilen bir bilgisayar yazılımıdır. 1987 yılında Hollanda'da bulunan Delft Teknik Üniversitesi tarafından yumuşak zemin üzerindeki dolguların analizinin sağlanabilmesi amacıyla geliştirilmiştir.

Yazılım aşağıda verilen adım sıralaması ile analizleri gerçekleştirmektedir.

1. Sistemin oluşturulması
2. Yaklaşım modelinin seçilmesi
3. Malzeme bünye davranışı
4. Eleman denklemleri
5. Global denklemlerin elde edilmesi
6. Sistem denklemlerinin çözülmesi (Birinci dereceden bilinmeyenlerin elde edilmesi)
7. İkincil bilinmeyenlerin elde edilmesi
8. Sonuçların yorumu

Çözümde ilk olarak problem geometrisi oluşturulur. Problemin tipine göre eksenel düzlem deformasyon (*plane strain*) ya da eksenel simetrik (*axisymetrical*) olarak modellenebilir (Şekil 5.1). Düzlem deformasyon modelinde, oluşturulan sistemde

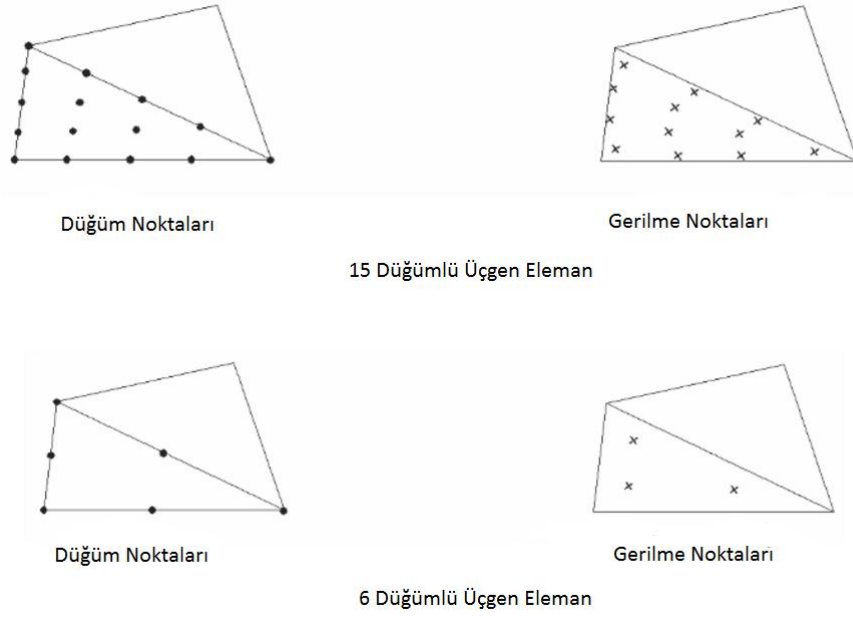
gerilmelerin ve deformasyonların z-ekseninde sıfır olduğu kabul edilir. Düzlem deformasyon modeli ile çözülebilecek olan sistemlere örnek olarak iksa yapıları, kazıklı temeller, tünel yapıları verilir. Eksenel simetrik, problemin z eksenini etrafında simetrik olması durumunda kullanılmaktadır. X eksenini sistemin çapını, y eksenini ise simetri eksenini temsil etmektedir. Bu duruma örnek olarak üç eksenli deneyler gösterilir.



Şekil 5.1 a) Düzlem deformasyon b) Eksenel simetri (Brinkgreve v.d. 2017)

Seçilen model tipinin ardından oluşturulan sistem, düğüm noktaları ile birbirine bağlı olan sonlu sayıda elemana ayrılır. Bu sonlu sayıdaki elemana “*sonlu eleman ağı (mesh)*” denir. Oluşturulan ağ ile sistemde denklemler her bir eleman için yazılabilmektedir. Sonlu eleman ağının kalitesi, çözümün gerçeğe yakınlığı ile doğrudan ilişkilidir. Sonlu eleman ağının oluşturulmasında üçgen elemanlar kullanılmaktadır. Düğüm ve gerilme noktalarının üçgen elemanlar üzerindeki dağılımı Şekil 5.2’de gösterilmiştir. Düğüm noktalarında yer değiştirmeler, gerilme noktalarında ise sistemdeki gerilmeler hesaplanmaktadır. 6 düğüm noktalı eleman ile yapılacak olan analizin bir ön çalışma olarak değerlendirilmesi, sistemde oluşan gerilme değerlerinin ve göçme yüzeylerinin hesaplanmasında daha doğru sonuca ulaşılması için 15 düğüm noktalı elemanın tercih edilmesi önerilmektedir [18].

Sonlu eleman ağında yer alan her bir eleman için uygun eleman denklemleri yazılır ve global denklemler, bu denklemlerin birleştirilmesi ile elde edilir. Bir başka deyişle; tüm ağ için rijitlik matrisi eleman rijitlik matrislerinin birleştirilmesi ile elde edilir.



Şekil 5.2 Üçgen elemanların düğüm ve gerilme noktaları (Brinkgreve v.d., 2017)

Elemana uygulanmış kütle kuvvetleri ve yüzeysel kuvvetler düğüme etkiyen kuvvet kümesine (düğüm kuvvetleri vektörü) dönüştürülür.

$$K^e \times U^e = P^e \dots\dots\dots(5.1)$$

Burada K^e : eleman rijitlik matrisi

Eleman Rijitlik Matrisinin elde edilmesi için her bir elemanda integrasyon yapılması gerekmektedir. Fonksiyonun integrali, çok sayıda integrasyon noktasından elde edilen fonksiyonun ağırlıklı toplamı ile bulunur.

Tüm ağ için rijitlik matrisi eleman rijitlik matrislerinin birleştirilmesi ile elde edilir. Elde edilen bu matrise global rijitlik matrisi denir.

$$K \times U = P \dots\dots\dots(5.2)$$

K: Rijitlik Matrisi

P: Düğüm Kuvvetlerinin Vektörü

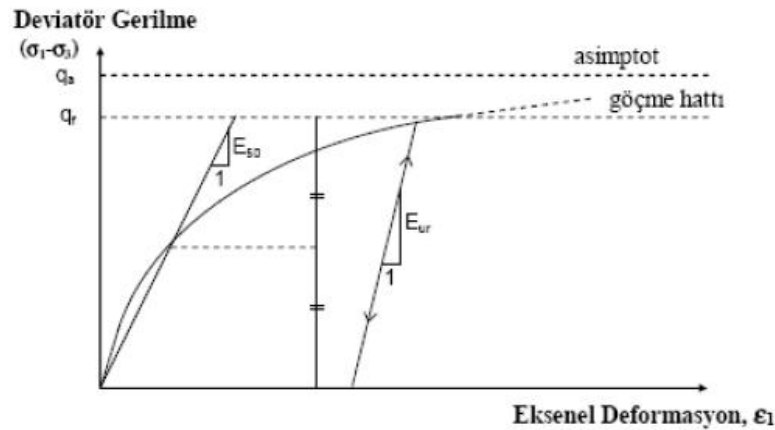
U: Düğüm Deplasmanı

Sınır koşulları uygulanmış olan sistemin tüm denklemleri çözülerek düğüm noktalarında oluşan deplasmanlar (birincil bilinmeyen) bulunur. Birincil bilinmeyenler elde edildikten sonra ikincil bilinmeyenler elde edilir. Yazılımda ikincil bilinmeyenler gerilmeler olarak tanımlanmıştır.

Sistemin bünye modelinin yani zemin davranışının modellenmesi için zemin özelliklerinin seçilmesi gerekir. İdeal malzeme lineer elastik ve homojendir. Ancak zeminin gerilme-şekil değiştirme davranışı elasto-plastiktir. Bu nedenle sonlu elamanlar analizinde zeminin iyi tanımlanabilmesi gerekir. Plaxis'te Mohr-Coulomb gerilme şekil değiştirme davranışının geliştirilmiş hali olan pekleşen zemin modeli (*Hardening Soil Model-HS Model*) zemini en iyi tanımlayan modeldir. Bu model plastik deformasyona bağlı olarak genişleyebilmektedir. HS Model, zeminin üç eksenli yükleme altında deviatorik gerilme (q) ile eksenel deformasyonun (ε) hiperbolik bir bağıntıya sahip olmasına dayanır. Bu bağıntı Duncan ve Chang tarafından (1970) tanımlanmıştır. Şekil 5.3'de gösterilen bu hiperbolik denklem $q < q_f$ için:

$$\varepsilon_1 = \frac{1}{2 \times E_{50}} \times \frac{q}{1 - q/q_a} \dots\dots\dots(5.3)$$

olarak ifade edilmektedir. Bu denklemde yer alan q_a , kayma mukavemetinin asimtotik değeridir. q_f göçme anındaki deviatör gerilme değeridir.

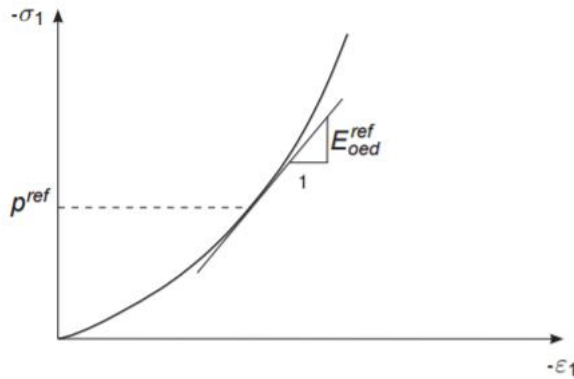


Şekil 5.3 Drenajlı üç eksenli basınç deneyinde hiperbolik gerilme şekil değiştirme grafiği (Brinkgreve v.d. 2017)

HS Modelde, Mohr-Coulomb kırılma hipotezi parametreleri olan kohezyon (c), kayma direnci açısı (ϕ) ve dilatansi (genleşme) açısı (ψ) değerlerinin girilmesi gerekmektedir. Ayrıca gerilme şekil değiştirme eğrisinde referans sekant modülü (E_{50}^{ref}), yükleme/boşaltma referans elastisite modülü (E_{ur}^{ref}) ve başlangıç ödometre yüklemesi için referans tanjant rijitliği (E_{oed}^{ref}) tanımlanmalıdır. Bu değerler ile E_{50} , E_{ur} ve E_{oed} değerleri elde edilir. Bu modelde rijitlik parametreleri çevresel gerilmeye (p^{ref}) bağlı olarak artmaktadır. Yazılım bu gerilme değerini (p^{ref}) 100 kN/m² olarak referans değer olarak verir.

$$E_{50} = E_{50}^{ref} \times \left(\frac{c \times \cos \phi - \sigma_3' \times \sin \phi}{c \times \cos \phi + p^{ref} \times \sin \phi} \right)^m \dots\dots\dots(5.4)$$

Ayrıca E_{ur} değeri, E_{50} değerinin 3-4 katı büyüklüğünde olduğu kabul edilerek hesaplamalarda kullanılır. Ödometre Elastisite Modülü Şekil 5.4'den veya denklem 5.5 ve 5.6'dan yararlanılarak bulunur.



Şekil 5.4 Ödometre deneyinden E_{oed} değerinin bulunması (Brinkgreve v.d. 2017)

$$E_{oed} = E_{oed}^{ref} \left(\frac{\sigma}{p^{ref}} \right)^m \dots\dots\dots(5.5)$$

$$E_{oed} = E_{oed}^{ref} \left(\frac{c \times \cos \phi - \frac{\sigma_3}{K_0^{nc}} \sin \phi}{c \times \cos \phi + p^{ref}} \right)^m \dots\dots\dots(5.6)$$

Normal konsolide olmuş killer için sükunetteki toprak basıncı katsayısı:

$$K_0^{NL} = 1 - \sin \phi \dots\dots\dots(5.7)$$

ile bulunur.

Gerilme değeri, üstel bir kurala göre rijitliğe bağlıdır. Bu da m (power) katsayısı ile formülasyonda ifade edilir. m değeri 0.5<m<1 arasında değişkenlik göstermektedir. Yumuşak killerde 1, kumlu siltli birimlerde ise 0.5 değerinde alınmalıdır.



6. HASSASLIK ANALİZİ VE PARAMETRE DEĞİŞİMİ

Hassaslık analizi ve parametre değişimi, model parametrelerinin analiz sonuçlarına olan etkisinin değerlendirilmesi için kullanılır. Model parametrelerinin belirlenemediği durumlarda oldukça faydalı olmaktadır.

6.1. Hassaslık Analizi

Hassaslık analizi sonrasında parametrelerin etkisi “Hassaslık Oranı (η_{SR} -*sensitivity ratio*)” ile ifade edilmektedir. Bu değer; elde edilen sonuçtaki değişimin, girdideki değişime oranının yüzdesi ile bulunmaktadır. Hassaslık oranı:

$$\eta_{SR} = \left[\frac{\frac{f(x_{L,R}) - f(x)}{f(x)} \times 100\%}{\frac{x_{L,R} - x}{x} \times 100\%} \right] \dots\dots\dots(6.1)$$

olarak ifade edilir. Denklem 6.1’de yer alan x , hassaslığı irdelenecek olan parametresinin referans, $x_{L,R}$ ise değiştirilmiş parametreyi ifade etmektedir. $f(x)$ ve $f(x_{L,R})$ ise referans ve değiştirilmiş değere bağlı fonksiyondan elde edilen değeri ifade etmektedir. Hassaslık oranına bağlı olan hassaslık sayısı (η_{SS} -*sensitivity score*), parametrelerin önemini daha anlaşılır kılmaktadır. Bu değer, normalleştirilmiş değer aralığının incelenen parametrenin referans değerine olan oranın, hassaslık oranı ile çarpımı ile bulunur:

$$\eta_{SS} = \eta_{SR} \times \frac{(\max x_R - \min x_R)}{x} \dots\dots\dots(6.2)$$

Burada;

Max x_R : seçilen maksimum parametre değeri

x : referans parametre değeri

Min x_R : seçilen maksimum parametre değeridir.

Her bir değişkenin hassaslık sayısı, tüm hesap aşamalarında tercih edilen sonuca göre (deplasman, kuvvet, güvenlik sayısı) hesaplanabilir. Bu hesabın matrisi Şekil 6.1’de

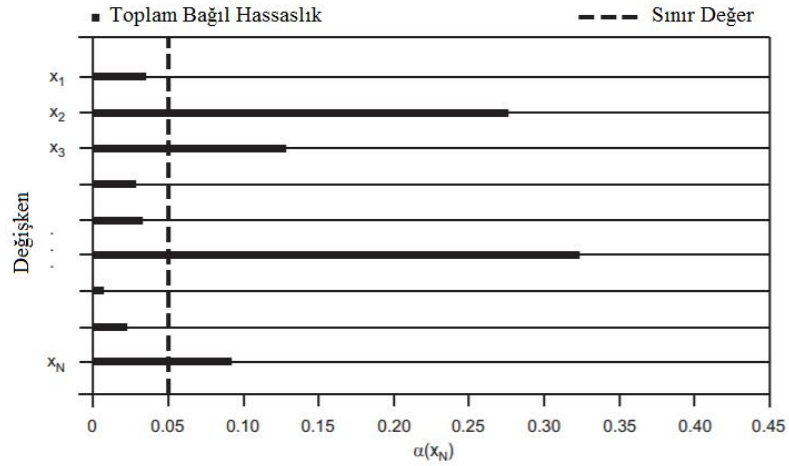
verilmiştir. Her bir değişkenin toplam hassaslık sayısı ($\sum \eta_{SS,i}$), her hesap aşamasında elde edilen toplam hassaslık sayısına eşittir.

	İlgili Sonuçlar					
	A	B	...	Z	Σ	α
Girdi Değişkenleri						%
x_1	$\eta_{SS,A1}$	$\eta_{SS,B1}$	...	$\eta_{SS,Z1}$	$\Sigma \eta_{SS,1}$	$\alpha(x_1)$
x_2	$\eta_{SS,A2}$	$\eta_{SS,B2}$	...	$\eta_{SS,Z2}$	$\Sigma \eta_{SS,2}$	$\alpha(x_2)$
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
x_N	$\eta_{SS,AN}$	$\eta_{SS,BN}$	...	$\eta_{SS,ZN}$	$\Sigma \eta_{SS,N}$	$\alpha(x_N)$

Şekil 6.1 Hassaslık matrisi (Brinkgreve v.d. 2017)

Toplam bağıl hassaslık (Peschl, 2004) denklem (6.3)'de verilmiştir.

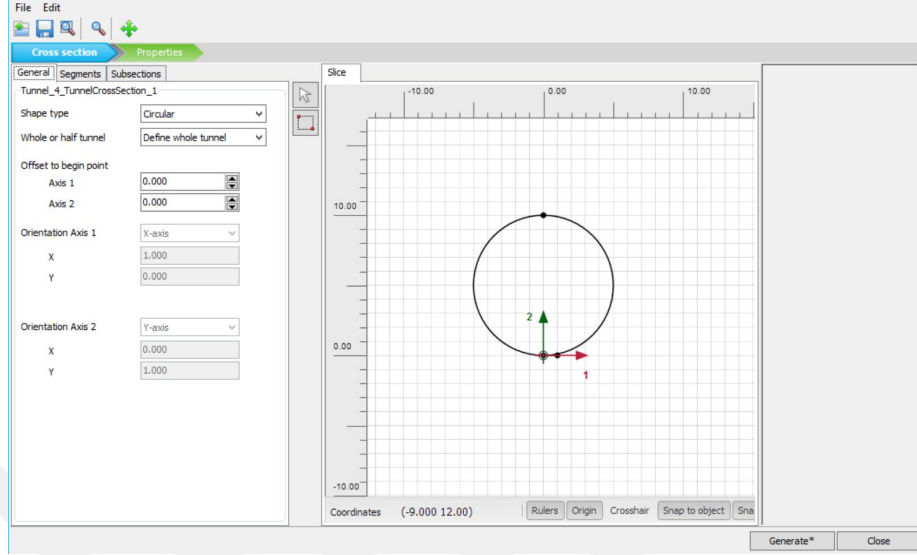
$$\alpha(x_i) = \frac{\sum \eta_{SS,i}}{\sum_{i=1}^N \sum \eta_{SS,i}} \dots \dots \dots (6.3)$$



Şekil 6.2 Toplam bağıl hassaslık (Brinkgreve v.d. 2017)

7. TÜNELLERİN MODELLENMESİ

Tünel kesitlerinin oluşturulması ve simüle edilebilmesi için yazılım özel bir elemana sahiptir. Tünel kesitleri “*tunnel*” yapı elemanı ile oluşturulur (Şekil 7-1).

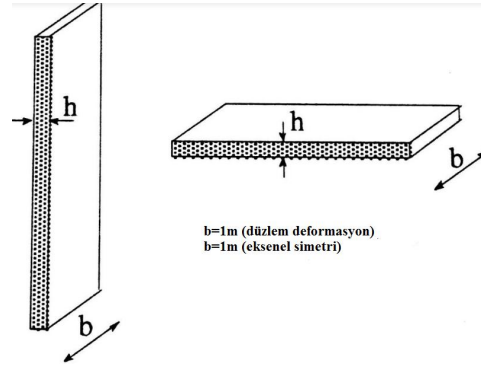


Şekil 7.1 Tünelin modellenmesi

TBM gibi dairesel kesitli tüneller için şekil tipi dairesel (*circular*), NATM gibi dairesel olmayan tünel kesidi için şekil tipi serbest (*free*) olarak tünel en kesiti oluşturulur. Dairesel kesitlerde tünel yarıçapının yazılıma girilmesi gerekirken, dairesel olmayan kesitlerde kesiti oluşturan yayların yarıçapı ve yay açısının girilmesi gerekmektedir. Tünel enkesitinin oluşturulmasının ardından tünel et kalınlığı (*d*) tanımlanmalıdır. Bunun için yazılımda plaka (*plate*) eleman kullanılır. Plaka eleman için tünel kaplamasının malzeme parametreleri olan eğilme rijitliği (*EI*) ve normal rijitlik (*EA*) değerleri girilir. Bu değerler tünel et kalınlığına ve malzemenin elastisite modülüne bağlıdır (Denklem 7.1 ve 7.2):

$$EI = E \times \frac{h^3 \times b}{12} \dots\dots\dots(7.1)$$

$$EA = E \times h \times b \dots\dots\dots (7.2)$$



Şekil 7.2 Plaka elemanın boyutları (Brinkgreve v.d. 2017)

TBM ile yapılan tünel kazıları, makina önünde yer alan zeminin kazılıp arkasına tünel kaplamasının yapılması ile oluşturulur. Bu kazılar yapılırken tünel hattının çapından daha büyük bir çap için kazılar yapılır. Bu iki çap arasında kalan alan daha sonra doldurulur ve deformasyonlar için önlemler alınır, ancak deformasyonların tam olarak önlenmesi mümkün değildir. Bu durumun sistemde yansıtılmak için “büzülme (*contraction*)” etkisinin sisteme tanımlanması gerekir. Buna ek olarak su basınçlarının tünel nedeniyle düzenlenmesi gerekmektedir. TBM ile inşa edilen tünelin aşamaları yazılımda aşağıdaki sıra takip edilerek yapılmalıdır:

1. İlk olarak tünel kaplaması etkinleştirilir. Tünel içerisindeki zemin ise etkisizleştirilir. Eğer sistemde tanımlanmış su seviyesi varsa su basınçları kalır. Bu nedenle tünel içerisinde oluşmuş olan su basınçlarının kaldırılması gerekir. Bu durumda tünel içerisi kuru (*dry*) olarak ayarlanmalıdır.

2. Büzülmenin etki ettirilmesi

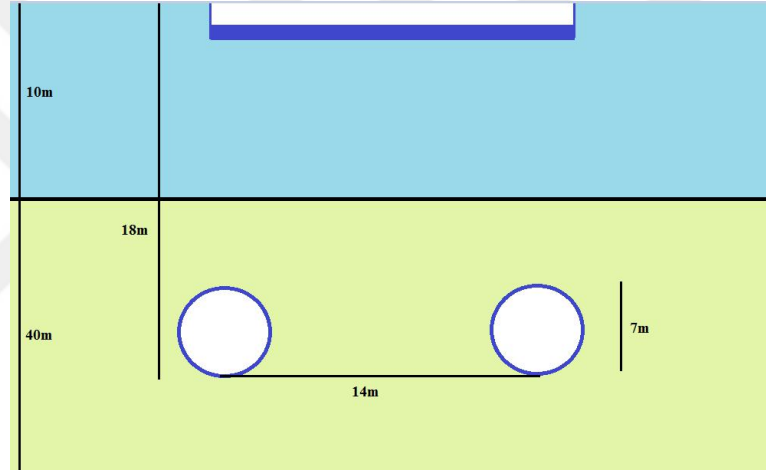
3. Tünel kaplaması ve büzülmenin etkisizleştirilmesi, enjeksiyon etkisinin tanımlanması

4. Tünel son kaplamasının etkinleştirilmesi

Zeminin etkisizleştirilmesi sadece zeminin rijitliğine, dayanımına ve efektif gerilmelere etki eder. Tünel kaplamasının oluşturulması, kazının yapılması, su basıncının tekrar oluşturulması, hacim kaybı plaxiste tünel kaplamasına büzülme (*contraction*) etki ederek, modelde simule edilir.

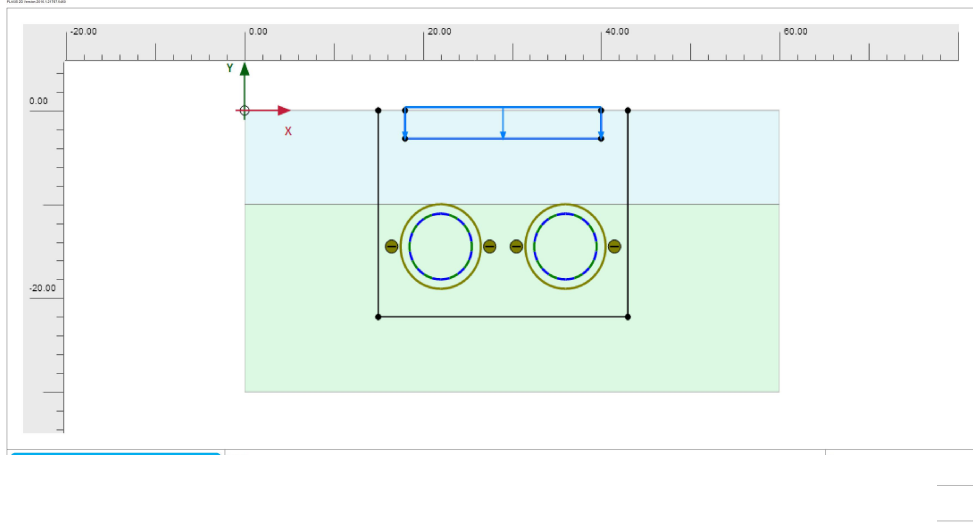
8. SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE YAPILAN TEMEL-METRO TÜNELİ ETKİLEŞİM ANALİZLERİ

Türkiye’de genellikle TBM ve NATM yöntemi ile metro tünellerinin açılması ve hesaplanması tercih edilmektedir. Bu çalışmada İstanbul Büyükşehir Belediyesi’nin Bağcılar-Yenikapı metro hattında uygulamış olduğu tünel projesi esas alınarak sisteme etki eden parametrelerin rolü yapı-zemin etkileşimi açısından irdelenmiştir. Modellemesi yapılacak olan kesitin zemin profili yüzeyden 10m derinliğe kadar kil, devamı kum olarak tanımlanmıştır. Yeraltı su seviyesi yüzeyden 4m aşağıdadır. EPB-TBM yöntemi açılacak olan ikiz metro tünellerinin çapı ise 7m’dir. Tüneller yüzeyden 18m derinlikte açılacaktır. İki tünelin orta eksenleri arasında 14m mesafe vardır (Şekil 8.1).

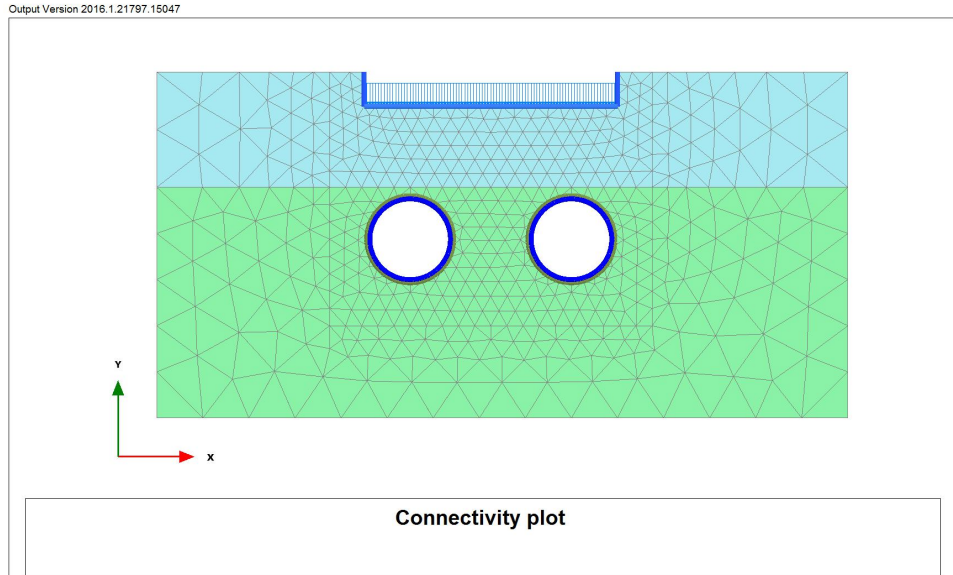


Şekil 8.1 Yapı ve tünellerin Konumu

Problem geometrisi meydana getirildikten sonra sonlu eleman ağı oluşturulmuştur. Sonlu eleman ağında 1254 adet üçgen eleman, 10345 düğüm noktası bulunmaktadır.



Şekil 8.2 Modele ait Geometri



Şekil 8.3 Modele ait sonlu eleman ağı

Analizler iki ayrı durum için gerçekleştirilmiştir:

1. Önce binanın inşa edildiği, tünellerin daha sonra kazıldığı durum,
2. Önce tünelin delinip daha sonra binaların inşa edildiği durum.

Zemin için bünye modeli olarak zemin davranışını en uygun şekilde tanımlayacak olan pekleşen zemin modeli (*hardening soil model*) kullanılmıştır. Her bir zemin özelliğinin sisteme olan etkisini bulmak için ilk olarak referans zemin parametreleri ile analizler gerçekleştirilmiştir. Başlangıç gerilmelerini oluşturmak amacıyla doğal

durumun analizi yapılmıştır. Sistemde zemin profilinin düzlemsel olması sebebiyle K_0 prosedürü uygulanmıştır. Suyun birim hacim ağırlığı 10kN/m^3 olarak tanımlanmıştır. Yazılım ilk aşamanın ardından deplasmanlar sıfırlanmaktadır. İkinci aşamaya geçişte hesap türü otomatik olarak plastik olarak değiştirilmektedir.

Tünel inşaatının gerçeğe en yakın şekilde modellenebilmesi için aşamalı bir analiz yapılması gereklidir. Bu aşamalar:

1. Aşama: Tünel içi zemin etkisizleştirilmeli ve tünel içi kuru olarak tanımlanmalıdır. TBM ve negatif arayüz (*negative interface*) etkinleştirilmelidir.
2. Aşama: Tünelde gerçekleşen büzülme (*contraction*) tanımlanmalıdır.
3. Aşama: Tünel kazı çapı ile tünel kaplaması arasındaki boşluğun doldurulması için yapılan enjeksiyon basıncı etkilidir. Enjeksiyon basıncı zeminin kendi ağırlığını ve yüzey oturmalarını dengelemek amaçlı kullanılmaktadır.
4. Aşama: Tünel kaplaması ve negatif arayüz etkinleştirilir.

Analizin aşamalarının oluşturulmasından sonra sistemin çözümü yapılmıştır. Ardından hassaslık analizi gerçekleştirilerek sisteme en çok etki eden parametreler bulunmuştur. Hassaslık derecesi yüksek olan parametrelerin maksimum ve minimum değerleri ile oluşturulan her bir kombinasyon için model çözülerek zemin parametrelerinin sisteme olan etkisi tayin edilmiştir. Hassaslık derecesi yüksek olan parametreler ile parametre analizi yapılmıştır. Böylece sistemde oluşan maksimum ve minimum deplasman değerleri elde edilmiştir. Zemin parametrelerinin etkisi bu yöntemle bulunduktan sonra deplasmanlara olan etkisini irdelemek için tünel örtü kalınlığı, temel gömme derinliği, bina yükünün etkisinin bulunması için analizler gerçekleştirilmiştir.

Tablo 8.1 Referans zemin parametreleri değerleri

Parametre	Sembol	Kil	Kum	Birim
Malzeme Modeli	-	Pekleşen Zemin Modeli	Pekleşen Zemin Modeli	-
Davranış Tipi	-	Drenajlı	Drenajlı	-
Kuru Birim Hacim Ağırlığı	ρ_{kuru}	15	17	kN/m ³
Yaş Birim Hacim Ağırlığı	$\rho_{yaş}$	19	21	kN/m ³
Sekant Modülü	E_{50}^{ref}	25000	35000	kN/m ²
Kohezyon	c'_{ref}	15	1	kN/m ²
Kayma Direnci Açısı	ϕ'_{ref}	27	34	°

Tablo 8.2 Tünel kaplaması malzeme özelliği

Parametre	Sembol	Değer	Birim
Betonun Elastisite Modülü	E_b	25E6	kPa
Normal Rijitlik	EA	14E6	kN/m
Eğilme Rijitliği	EI	186E3	kNm ² /m
Tünel Et Kalınlığı	d	0.4	m
Ağırlık	W	12	kN/m/m
Poisson Oranı	ν	0.2	-

8.1. Durum 1-Önce Bina Sonra Tünellerin İnşa Edildiği Durum-Tünel Kumda

Bu analizlerde tünel inşaatı sırasında TBM makinası delgiyi tamamladıktan sonra kaplama yapılırken, mevcut yapı temelinde meydana getireceği deformasyonlar değerlendirilmiştir.

Analiz aşamaları, binanın önceden yapıldığı göz önünde bulundurularak buna göre tünel modellenmiştir. Tünelde oluşabilecek etkileri gerçeğe en yakın şekilde gösterecek modelin oluşturulması hedeflenmiştir:

1.Aşama: Doğal durum analiz edilmiştir (*K₀ Procedure*).

2.Aşama: Bina temel kazısı yapılarak, temel ve bina yükü etki edilmiştir (90kPa).

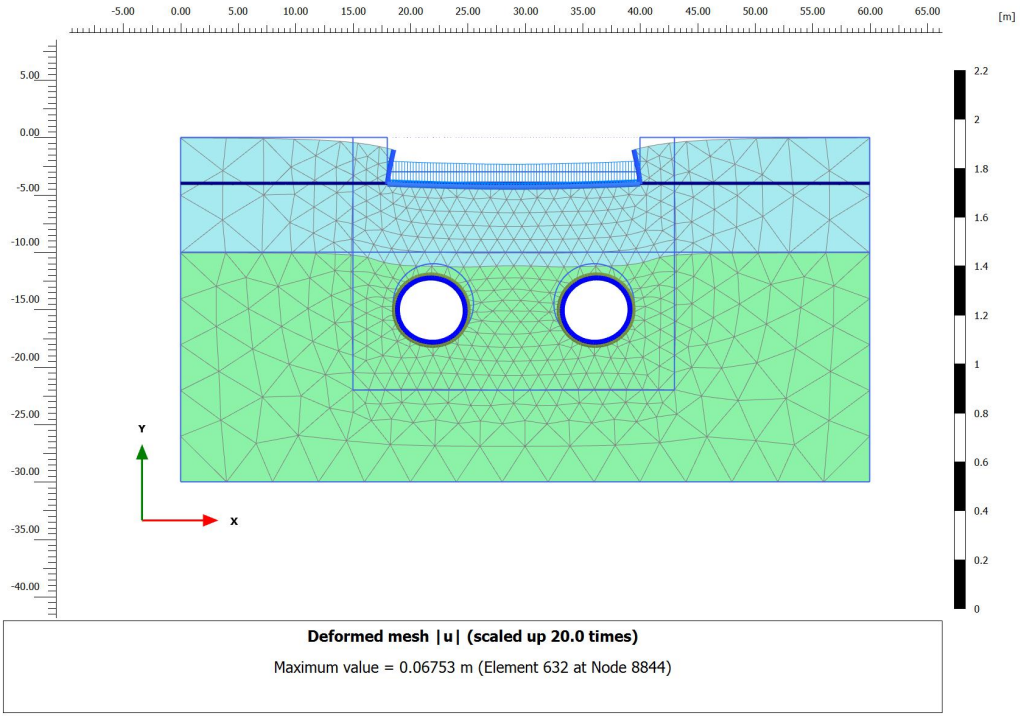
3.Aşama: Sistemde oluşan deplasmanlar sıfırlanmış, tünel içi zemin etkisizleştirilmiş ve tünel içi kuru olarak tanımlanmıştır. TBM ve negatif arayüz (*negative interface*) etkinleştirilmiştir.

4.Aşama: Tünelde gerçekleşen büzülme tanımlanmıştır. Büzülmenin %2 oranında etki edeceği kabul edilmiştir.

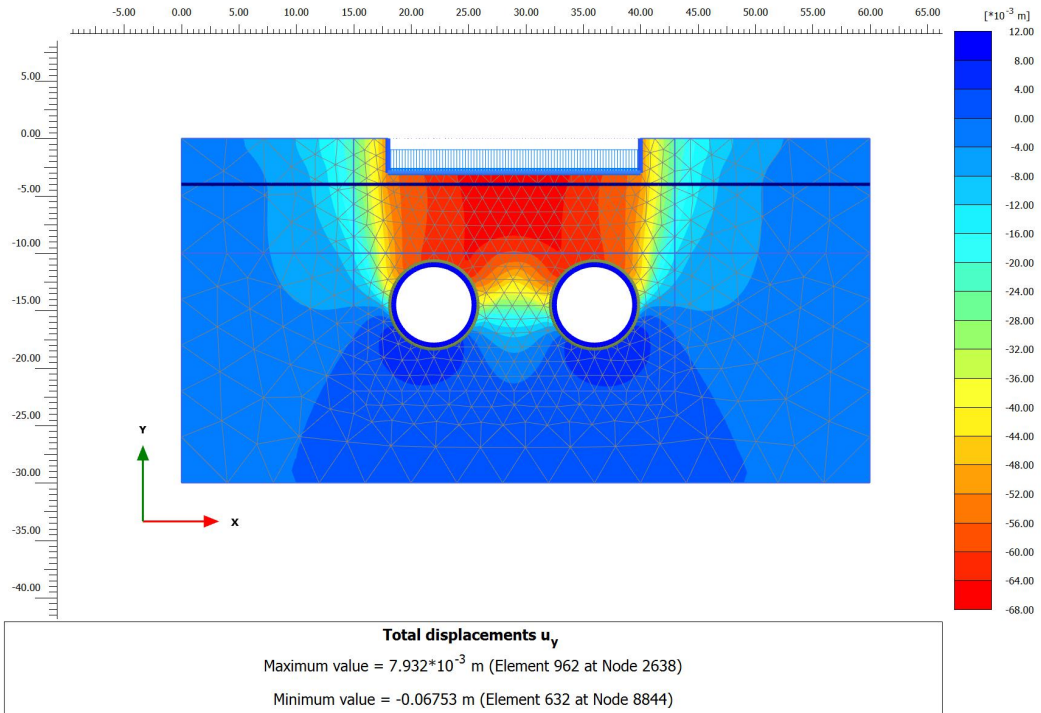
5.Aşama: Tünel kazı çapı ile tünel kaplaması arasındaki boşluğun doldurulması için enjeksiyon basıncı etki edilmiştir. Enjeksiyon basıncı olarak $p_{ref}=240kPa$ yeterli görülmüştür.

6.Aşama: Tünel Kaplaması etkinleştirilmiştir.

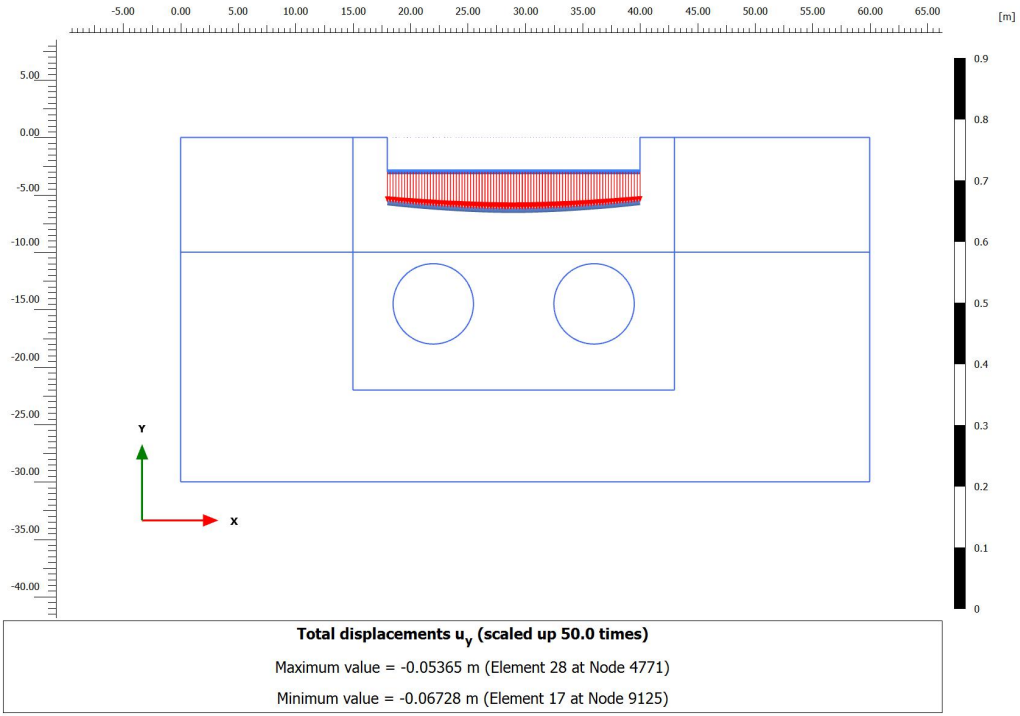
Şekil 8-4'te deforme olmuş olan sonlu eleman ağı, Şekil 8.5 ve 8.6'da tünel inşasının ardından sistem ve yapı temelinde oluşan deformasyonlar gösterilmiştir.



Şekil 8.4 Deforme olmuş sonlu eleman ağı (Durum 1)



Şekil 8.5 Toplam düşey deformasyon ($u_y=0.06753m$) (Durum 1)



Şekil 8.6 Temelde oluşan toplam düşey deformasyon ($u_y=0.0628\text{m}$) (Durum 1)

Yapılan analizin ardından hassaslık analizi gerçekleştirilmiştir. Analizde kil tabakası için sekant modülü (E_{50}^{ref}), kohezyon (c'_{ref}), ve kayma direnci açısı (ϕ'), birim hacim ağırlıkları (ρ_{kuru} , ρ_{doygun}), kum birim için sekant modülü (E_{50}^{ref}), kayma direnci açısı (ϕ'), birim hacim ağırlıkların (ρ_{kuru} , ρ_{doygun}), etkisi irdelenmiştir. Şekil 8.7'de analizlerde kullanılan parametrelerin minimum ve maksimum değerleri verilmiştir. Hassaslık analizinde etkisi irdelenecek olan değişken sayısı böylece $n=9$ olmaktadır.

Type	Material	Parameter	Min	Ref	Max
Soil	Kil	γ_{unsat}	14.80	15.00	15.20
Soil	Kil	γ_{sat}	18.80	19.00	19.20
Soil	Kil	E_{50}^{ref}	20.00E3	25.00E3	30.00E3
Soil	Kil	c'_{ref}	10.00	15.00	20.00
Soil	Kil	ϕ' (phi)	25.00	27.00	29.00
Soil	Kum	γ_{unsat}	16.80	17.00	17.20
Soil	Kum	γ_{sat}	20.80	21.00	21.20
Soil	Kum	E_{50}^{ref}	25.00E3	35.00E3	45.00E3
Soil	Kum	ϕ' (phi)	32.00	34.00	35.00

Şekil 8.7 Parametrelerin minimum ve maksimum değerleri

Değişkenlere minimum ve maksimum değer tanımlanarak analizler gerçekleştirilmiştir. N=9 ile 19(2n+1) farklı kombinasyon oluşturulmuştur.

Hassaslık analizi kriteri olarak tünelin inşa aşamalarında temel in ortasında meydana gelen toplam düşey deformasyon (u_y) seçilmiştir.

Name	V_{unsat} [Kil]	V_{sat} [Kil]	E_{50}^{ref} [Kil]	c'_{ref} [Kil]	ϕ' (phi) [Kil]	V_{unsat} [Kum]	V_{sat} [Kum]	E_{50}^{ref} [Kum]	ϕ' (phi) [Kum]
Durum 1_00	15.20	19.00	25.00E3	15.00	27.00	17.00	21.00	35.00E3	34.00
Durum 1_01	14.80	19.00	25.00E3	15.00	27.00	17.00	21.00	35.00E3	34.00
Durum 1_02	15.00	19.20	25.00E3	15.00	27.00	17.00	21.00	35.00E3	34.00
Durum 1_03	15.00	18.80	25.00E3	15.00	27.00	17.00	21.00	35.00E3	34.00
Durum 1_04	15.00	19.00	30.00E3	15.00	27.00	17.00	21.00	35.00E3	34.00
Durum 1_05	15.00	19.00	20.00E3	15.00	27.00	17.00	21.00	35.00E3	34.00
Durum 1_06	15.00	19.00	25.00E3	20.00	27.00	17.00	21.00	35.00E3	34.00
Durum 1_07	15.00	19.00	25.00E3	10.00	27.00	17.00	21.00	35.00E3	34.00
Durum 1_08	15.00	19.00	25.00E3	15.00	29.00	17.00	21.00	35.00E3	34.00
Durum 1_09	15.00	19.00	25.00E3	15.00	25.00	17.00	21.00	35.00E3	34.00
Durum 1_10	15.00	19.00	25.00E3	15.00	27.00	17.20	21.00	35.00E3	34.00
Durum 1_11	15.00	19.00	25.00E3	15.00	27.00	16.80	21.00	35.00E3	34.00
Durum 1_12	15.00	19.00	25.00E3	15.00	27.00	17.00	21.20	35.00E3	34.00
Durum 1_13	15.00	19.00	25.00E3	15.00	27.00	17.00	20.80	35.00E3	34.00
Durum 1_14	15.00	19.00	25.00E3	15.00	27.00	17.00	21.00	45.00E3	34.00
Durum 1_15	15.00	19.00	25.00E3	15.00	27.00	17.00	21.00	25.00E3	34.00
Durum 1_16	15.00	19.00	25.00E3	15.00	27.00	17.00	21.00	35.00E3	35.00
Durum 1_17	15.00	19.00	25.00E3	15.00	27.00	17.00	21.00	35.00E3	32.00

Şekil 8.8 Hassaslık analizi kombinasyonları

Type	Material	Parameter	Min	Ref	Max	SensiScore	
Soil	Kil	V_{unsat}	14.80	15.00	15.20	2	
Soil	Kil	V_{sat}	18.80	19.00	19.20	6	Criterion 1
Soil	Kil	E_{50}^{ref}	20.00E3	25.00E3	30.00E3	6	Phase Phase_2 [Phase ▼ Criterion Displacement ▼
Soil	Kil	c'_{ref}	10.00	15.00	20.00	9	Point A(29.00; -3.00; ▼ Value type Uy ▼
Soil	Kil	ϕ' (phi)	25.00	27.00	29.00	3	
Soil	Kum	V_{unsat}	16.80	17.00	17.20	0	Criterion 2
Soil	Kum	V_{sat}	20.80	21.00	21.20	5	Phase Phase_3 [Phase ▼ Criterion Displacement ▼
Soil	Kum	E_{50}^{ref}	25.00E3	35.00E3	45.00E3	44	Point A(29.00; -3.00; ▼ Value type Uy ▼
Soil	Kum	ϕ' (phi)	32.00	34.00	35.00	25	
							Criterion 3
							Phase Phase_4 [Phase ▼ Criterion Displacement ▼ Point A(29.00; -3.00; ▼ Value type Uy ▼
							Criterion 4
							Phase Phase_5 [Phase ▼ Criterion Displacement ▼ Point A(29.00; -3.00; ▼ Value type Uy ▼

Şekil 8.9 Parametrelerin hassaslık derecesi değerleri

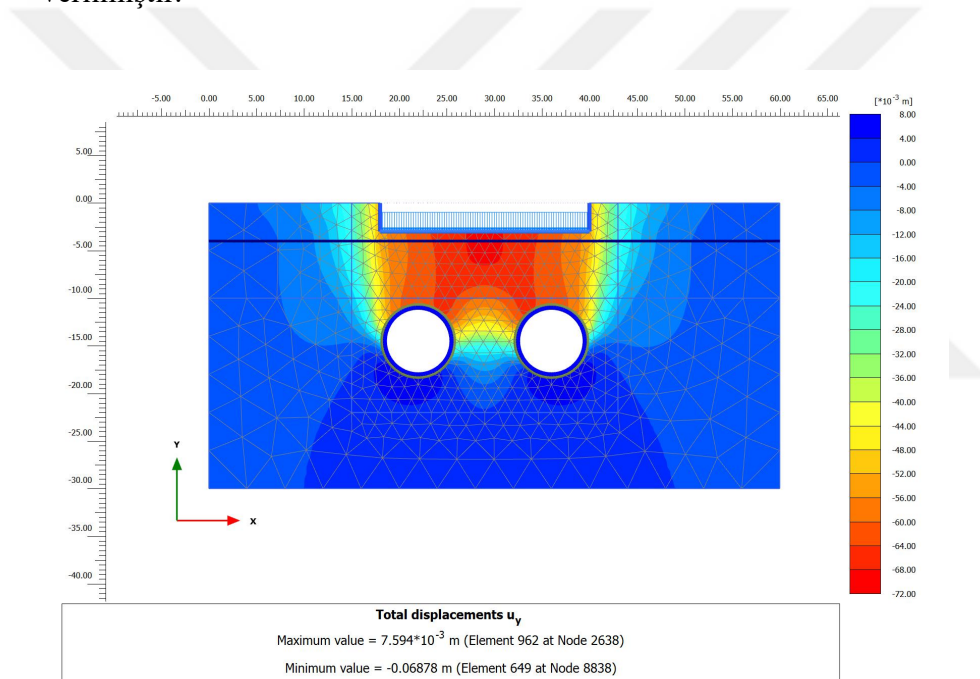
Mevcut bir yapı altında kazısı yapılan tünelin, temelde meydana getirdiği oturmaya en çok etki eden değer; tünelin yer aldığı birim olan kumun kiriş deformasyon modülü (E_s) ve kayma direnci açısıdır (Şekil 8.9). Diğer parametrelerdeki değişikliklerin deplasmana olan etkisi ihmal edilebilecek düzeyde kalmıştır.

Hassaslık sayısı yüksek olan bu iki değer seçilerek parametre analizi gerçekleştirilmiştir. Parametre analizi kombinasyonları Şekil 8.10'da gösterilmiştir.

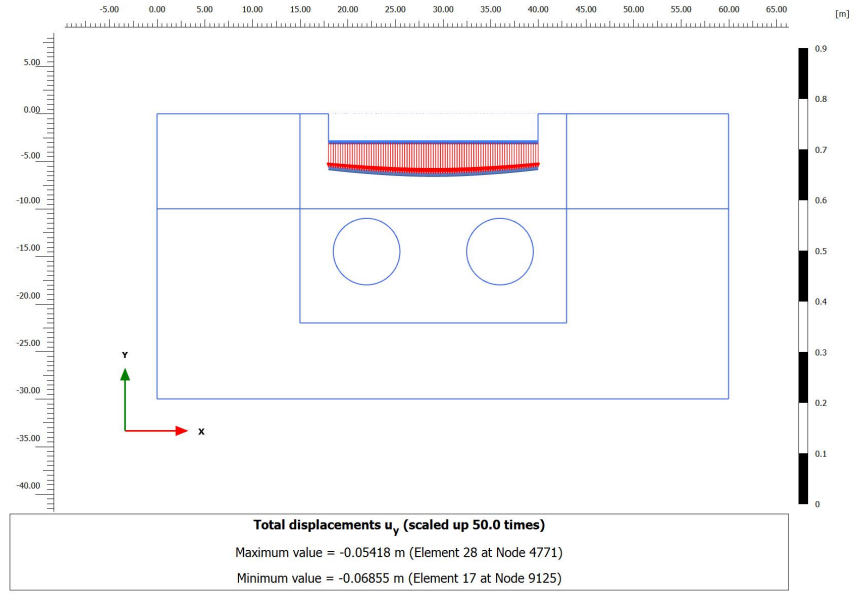
Name	Msg	E_{50}^{ref} [Kum]	φ' (phi) [Kum]
Durum 1_00	OK	25.00E3	32.00
Durum 1_01	OK	25.00E3	35.00
Durum 1_02	OK	45.00E3	32.00
Durum 1_03	OK	45.00E3	35.00

Şekil 8.10 Parametre analizinde yapılan analiz kombinasyonları

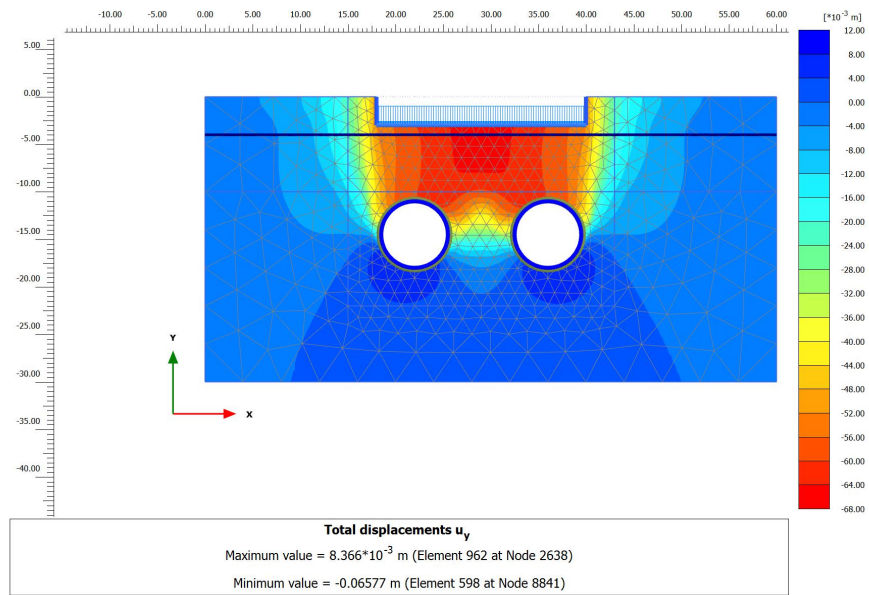
Parametre analizi sonucunda sistemde ve temel altında oluşan maksimum ve minimum deplasman değerleri Şekil 8.11, Şekil 8.12, Şekil 8.13 ve Şekil 8.14'te verilmiştir.



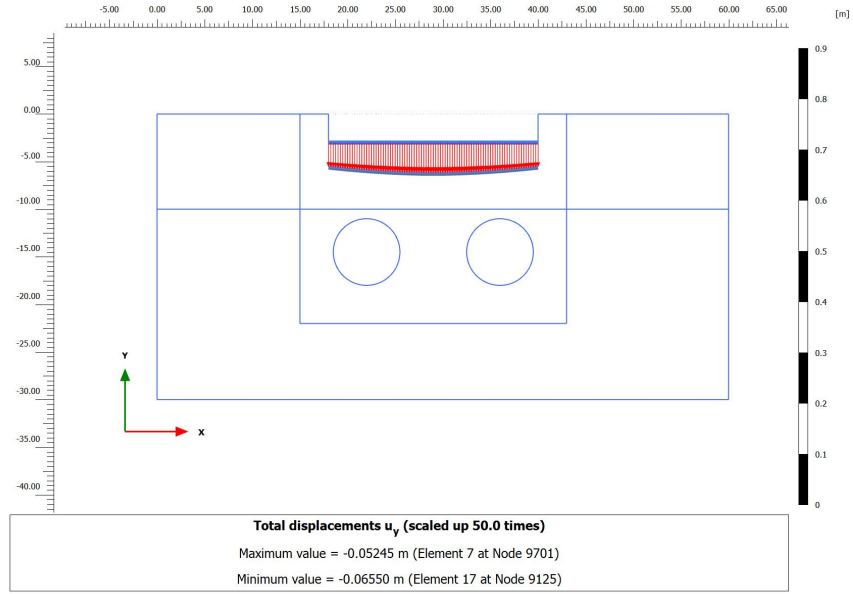
Şekil 8.11 Minimum parametre değerleri ile parametre analizinde elde edilen düşey deplasman değerleri (Durum 1)



Şekil 8.12 Minimum değerler ile parametre analizinde elde edilen temelde oluşan düşey deplasman değerleri



Şekil 8.13 Maksimum değerler ile parametre analizinde elde edilen düşey deplasman değerleri (Durum 1)



Şekil 8.14 Maksimum değerler ile parametre analizinde elde edilen temelde oluşan düşey deplasman değerleri (Durum 1)

Hassaslık analizi ve parametre değişiminin ardından tünel konumu, temel gömme derinliği ve yapı yükünün modele olan etkisinin irdelenmesi için belirtilen öğeler değiştirilerek analizler gerçekleştirilmiştir. Analizler sonucunda yapı temelinde oluşan ek deplasman değerleri Tablo 8.3, Tablo 8.4 ve Tablo 8.5’te yer almaktadır.

Tablo 8.3 Temel gömme gerinliği (D_f)’in değiştirilmesi ile temelde oluşan düşey deplasmanlar (Durum 1)

D_f (m)	Bina inşası ile temelde oluşan düşey deplasman (m)	Tünel inşası sonrası temelde oluşan ek düşey deplasman (m)
-2	0.045	0.064
-3	0.034	0.062
-4	0.024	0.061

Tablo 8.4 Bina yükü (q)'nün değiştirilmesi ile temelde oluşan düşey deplasmanlar
(Durum 1)

q (kPa)	Bina inşası ile temelde oluşan düşey deplasman (m)	Tünel inşası sonrası temelde oluşan ek düşey deplasman (m)
60	0.016	0.057
90	0.034	0.062
120	0.050	0.067

Tablo 8.5 Tünel derinliğinin değiştirilmesi ile temelde oluşan düşey deplasmanlar
(Durum 1)

z (m)	Bina inşası ile temelde oluşan düşey deplasman (m)	Tünel inşası sonrası temelde oluşan ek düşey deplasman (m)
15	0.034	0.054
18	0.034	0.062
21	0.034	0.066
30	0.034	0.069

8.2. Durum 2-Önce Tünel Sonra Binanın İnşa Edildiği Durum-Tünel Kilde

Bu analizlerde inşa edilecek olan yapı yükünün mevcut metro tünellerinde meydana getireceği deformasyonlar ile tünellerde herhangi bir olumsuz etkinin olup olmayacağı değerlendirilmiştir. Analiz aşamaları, binanın önceden yapıldığı göz

önünde bulundurulup buna göre tünel modellenmiştir. Tünelde oluşabilecek etkileri gerçeğe en yakın şekilde modellemek hedeflenmiştir:

1.Aşama: Doğal durum analiz edilmiştir. (*K₀ Procedure*)

2.Aşama: Sistemde oluşan deplasmanlar sıfırlanmış, tünel içi zemin etkisi hale getirilmiş ve tünel içi kuru olarak tanımlanmıştır. Tünel kaplaması ve negatif arayüz (*negatif interface*) etkinleştirilmiştir.

3.Aşama: Tünelde gerçekleşen büzülme tanımlanmıştır.

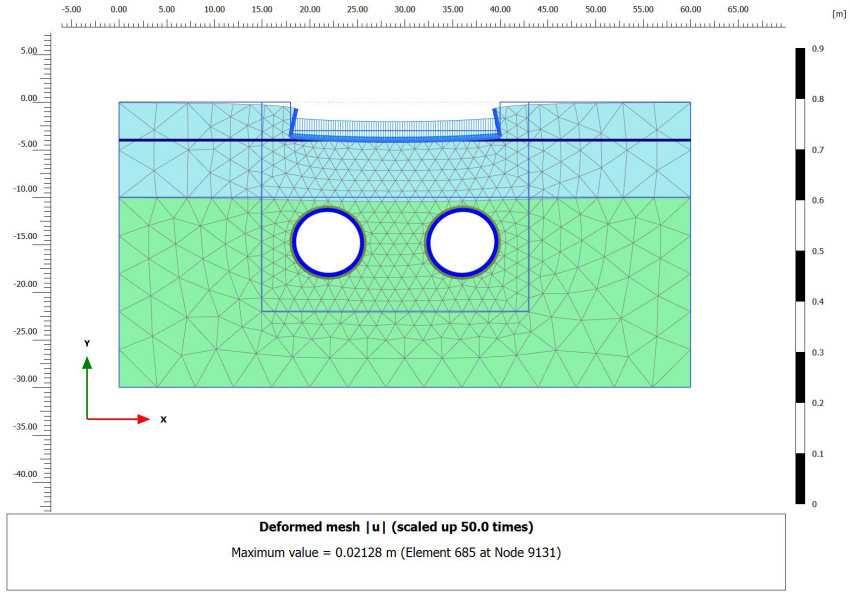
4.Aşama: Tünel kazı çapı ile tünel kaplaması arasındaki boşluğun doldurulması için enjeksiyon basıncı etki edilmiştir. Enjeksiyon basıncı olarak $p_{ref}=240kPa$ yeterli görülmüştür.

5.Aşama: Tünel kaplaması etkin edilmiştir.

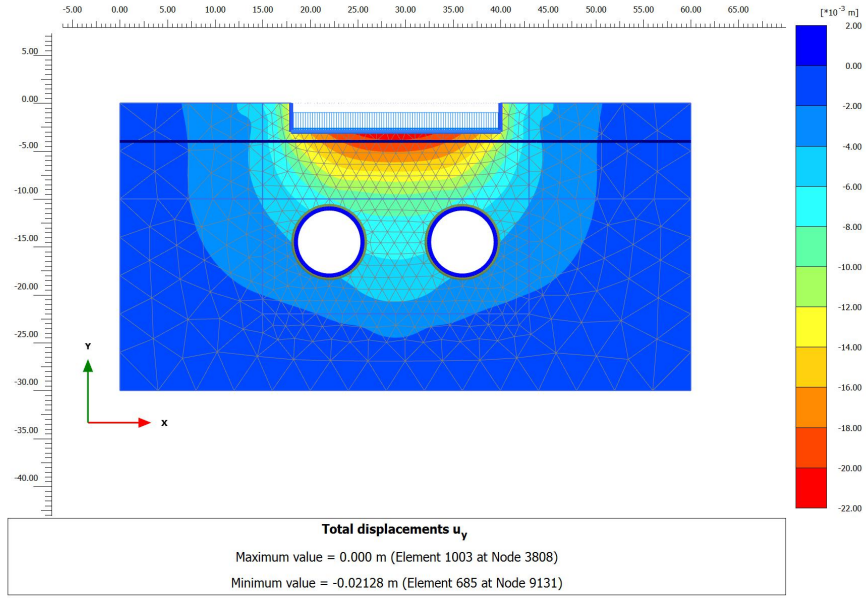
6.Aşama: Deplasmanlar sıfırlanmış, bina temel kazısı yapıp, temel ve bina yükü etkilenmiştir.

Analizin aşamalarının oluşturulmasından sonra sistemin çözümü yapılmıştır. Ardından hassaslık analizi gerçekleştirilerek sisteme en çok etki eden parametreler bulunmuştur. Hassaslık derecesi yüksek olan parametrelerin maksimum ve minimum değerleri ile oluşturulan her bir kombinasyon için model çözülerek zemin parametrelerinin sisteme olan etkisi tayin edilmiştir. Hassaslık derecesi yüksek olan parametreler ile parametre analizi yapılmıştır. Böylece sistemde oluşan maksimum ve minimum deplasman değerleri elde edilmiştir. Zemin parametrelerinin etkisi bu yöntemle bulunduktan sonra modele olan etkisinin irdelenmesi için tünel örtü kalınlığı, temel gömme derinliği, bina yükünün etkisinin bulunması için analizler gerçekleştirilmiştir.

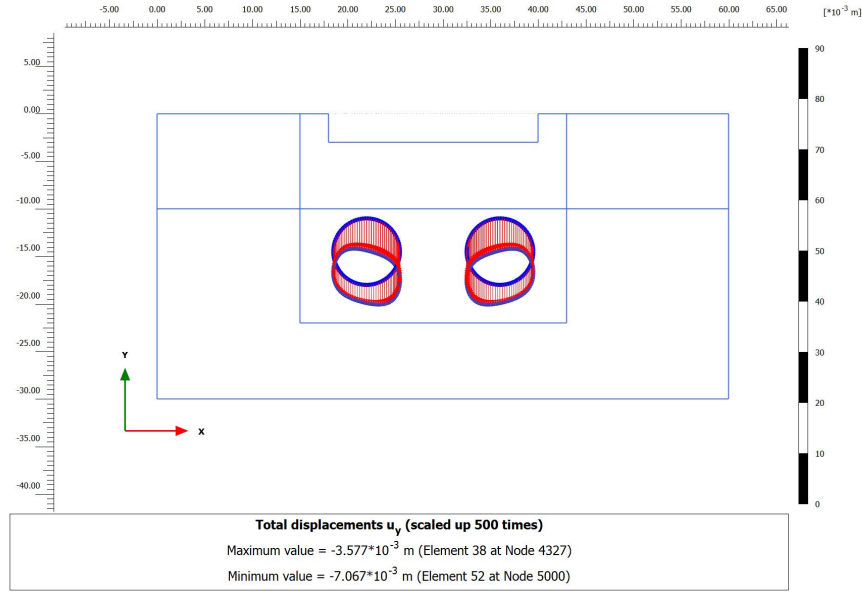
Şekil 8.15'te deforme olmuş sonlu eleman ağı, Şekil 8.16 ve 8.17'de tünel inşasının ardından sistem ve yapı temelinde oluşan deformasyonlar gösterilmiştir.



Şekil 8.15 Deforme olmuş sonlu eleman ağı (Durum 2)



Şekil 8.16 Modelde oluşan toplam düşey deformasyon ($u_y=0.0218m$)



Şekil 8.17 Tünel kaplamasında oluşan toplam düşey deformasyon ($u_y=0.007\text{m}$)
(Durum 2)

Yapılan analizin ardından hassaslık analizi gerçekleştirilmiştir. Hassaslık analizinde etkisi irdelenen değişken sayısı $n=9$ 'dur. Şekil 8.7'de analizlerde kullanılan parametrelerin minimum ve maksimum değerleri verilmiştir.

$N=9$ ile 19 ($2n+1$) farklı kombinasyon oluşturulmuştur (Şekil 8.6, Şekil 8.7). Hassaslık analizi kriteri olarak bina yükü etki edildiği anda tünelin üst kısmında meydana gelen toplam düşey deformasyon (u_y) seçilmiştir. Elde edilen hassaslık derecesi değerleri Şekil 8.18'de verilmektedir.

Type	Material	Parameter	Min	Ref	Max	SensiScore	
Soil	Kil	γ_{unsat}	14.80	15.00	15.20	16	
Soil	Kil	γ_{sat}	18.80	19.00	19.20	2	
Soil	Kil	E_{50}^{ref}	20.00E3	25.00E3	30.00E3	1	
Soil	Kil	c_{ref}	10.00	15.00	20.00	6	
Soil	Kil	$\phi'(\text{phi})$	25.00	27.00	29.00	3	
Soil	Kum	γ_{unsat}	16.80	17.00	17.20	0	
Soil	Kum	γ_{sat}	20.80	21.00	21.20	5	
Soil	Kum	E_{50}^{ref}	25.00E3	35.00E3	45.00E3	33	
Soil	Kum	$\phi'(\text{phi})$	32.00	34.00	35.00	33	

Criterion 1

Phase Phase_1 [Phase ▼]

Criterion Displacement ▼

Point A(29.00; -3.00; ▼)

Value type Uy ▼

Şekil 8.18 Parametrelerin hassaslık derecesi değerleri

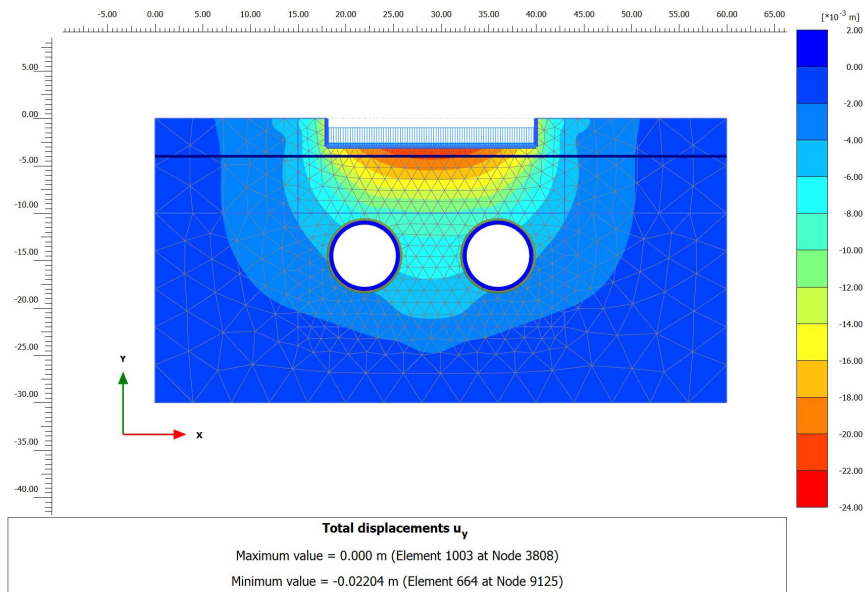
Mevcut bir tünel üzerinde yapılan temelin, tünel yapısında meydana getirdiği deformasyona en çok etki eden zemin parametresi, kum birimin kuru birim hacim ağırlığı ve sekant modülü olarak bulunmuştur. Kil birim için ise birim hacim

ağırlığıdır. Bu üç değer seçilerek parametre analizi gerçekleştirilmiştir. Parametre analizi kombinasyonları Şekil 8.19’da gösterilmiştir.

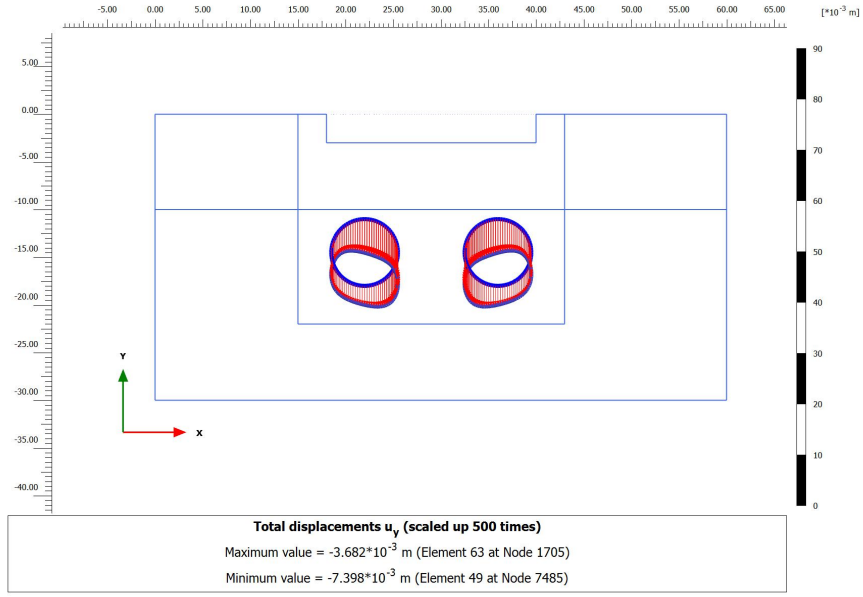
Name	Msg	γ_{unsat} [Kil]	E_{50}^{ref} [Kum]	ϕ' (phi) [Kum]
Durum 2_00	OK	14.80	25.00E3	32.00
Durum 2_01	OK	14.80	25.00E3	35.00
Durum 2_02	OK	14.80	45.00E3	32.00
Durum 2_03	OK	14.80	45.00E3	35.00
Durum 2_04	OK	15.20	25.00E3	32.00
Durum 2_05	OK	15.20	25.00E3	35.00
Durum 2_06	OK	15.20	45.00E3	32.00
Durum 2_07	OK	15.20	45.00E3	35.00

Şekil 8.19 Parametre analizinde yapılan analiz kombinasyonları

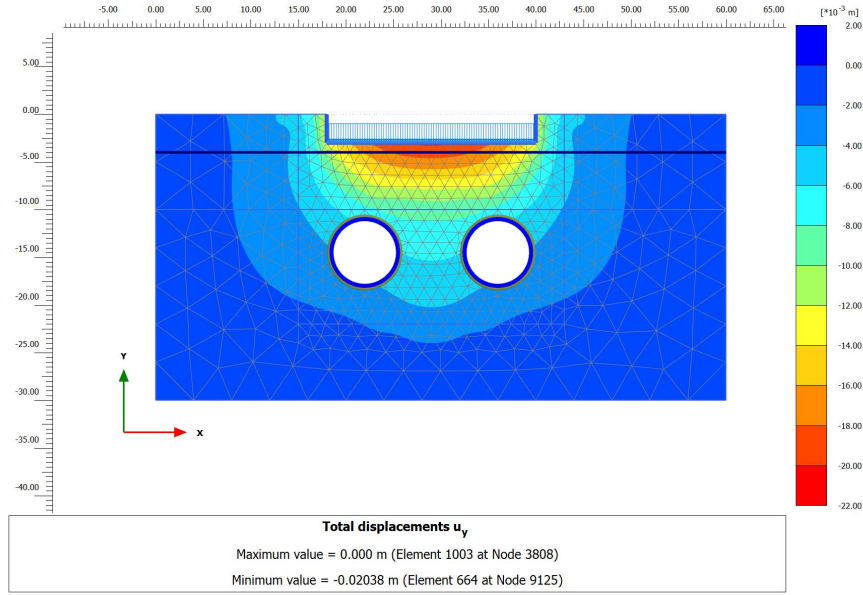
Parametre analizi sonucunda sistemde ve tünelde meydana gelen maksimum ve minimum deplasman değerleri Şekil 8.20, Şekil 8.21, Şekil 8.22 ve Şekil 8.23’te verilmiştir.



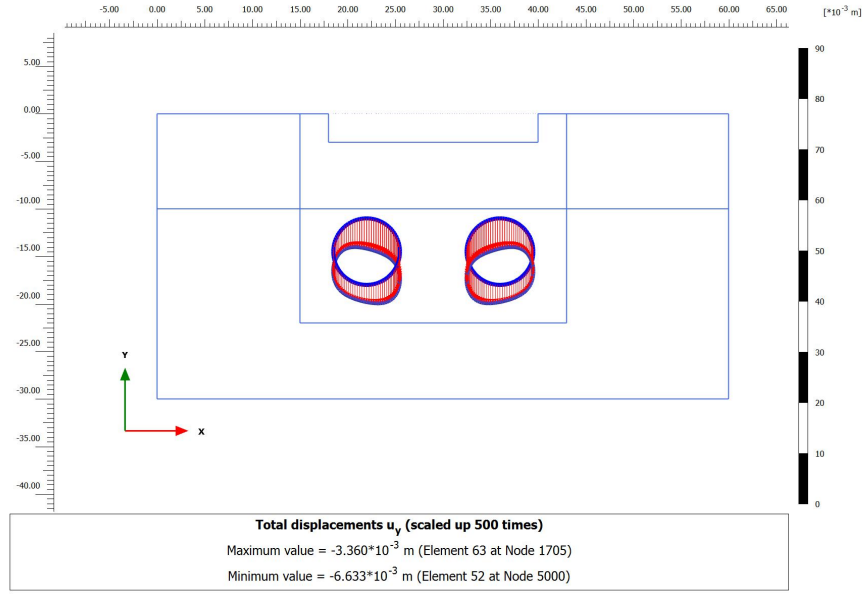
Şekil 8.20 Minimum parametre değerleri ile parametre analizinde elde edilen düşey deplasman değerleri (Durum 2)



Şekil 8.21 Minimum parametre değerleri ile parametre analizinde elde edilen tünel kaplamasında oluşan düşey deplasman değerleri (Durum 2)



Şekil 8.22 Maksimum parametre değerleri ile parametre analizinde elde edilen düşey deplasman değerleri (Durum 2)



Şekil 8.23 Maksimum parametre değerleri ile parametre analizinde elde edilen tünel kaplamasında oluşan düşey deplasman değerleri (Durum 2)

Hassaslık analizi ve parametre değişiminin ardından tünel konumu, temel gömme derinliği ve yapı yükünün modele olan etkisinin irdelenmesi için belirtilen öğeler değiştirilerek analizler gerçekleştirilmiştir. Analiz sonucunda tünel kaplamasında oluşan ek deplasman değerleri Tablo 8.6, Tablo 8.7 ve Tablo 8.8’de yer almaktadır.

Tablo 8.6 Gömme derinliği (D_f)’in değiştirilmesi ile tünel kaplamasında oluşan düşey deplasmanlar (Durum 2)

D_f (m)	Tünel inşası ile tünel kaplamasında oluşan düşey deplasman (m)	Bina inşası sonrası tünel kaplamasında oluşan ek düşey deplasman (m)
-2	0.05	0.0087
-3	0.05	0.0071
-4	0.05	0.0053

Tablo 8.7 Bina yükü (q)'nün değiştirilmesi ile tünel kaplamasında oluşan düşey deplasmanlar (Durum 2)

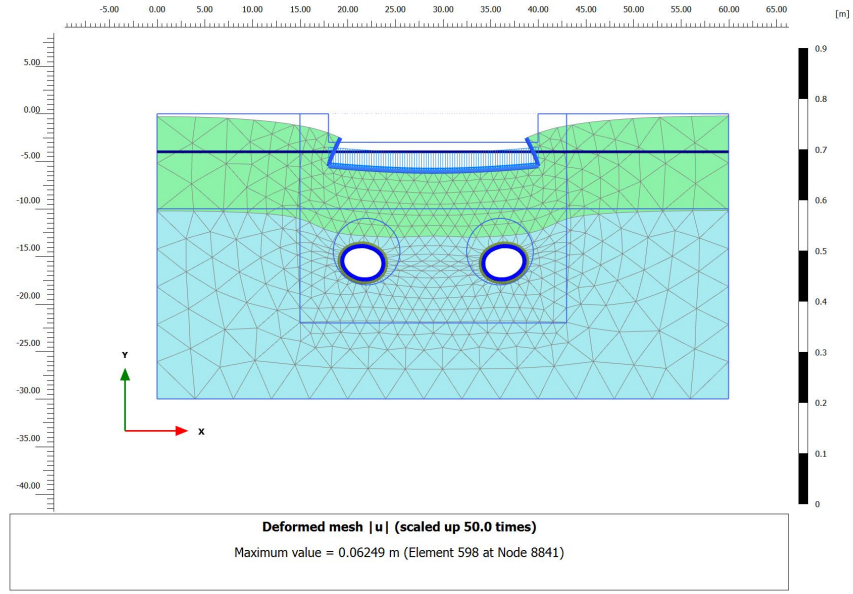
q (kPa)	Tünel inşası ile tünel kaplamasında oluşan düşey deplasman (m)	Bina inşası sonrası tünel kaplamasında oluşan ek düşey deplasman (m)
60	0.05	0.0032
90	0.05	0.0071
120	0.05	0.012

Tablo 8.8 Tünel derinliğinin değiştirilmesi ile tünel kaplamasında oluşan düşey deplasmanlar (Durum 2)

z (m)	Tünel inşası ile tünel kaplamasında oluşan düşey deplasman (m)	Bina inşası sonrası tünel kaplamasında oluşan ek düşey deplasman (m)
15	0.048	0.0087
18	0.050	0.0071
21	0.070	0.0047
30	0.072	0.0051

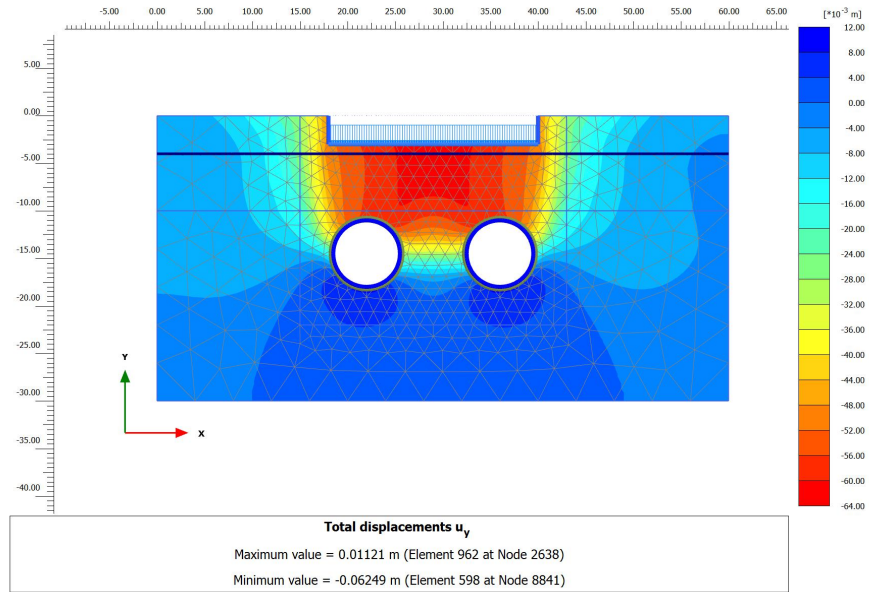
8.3. Durum 3-Önce Tünel Sonra Binanın İnşa Edildiği Durum-Tünel Kumda

Zemin profili yüzeyden 10m derinliğe kadar kum, devamı kil olarak tanımlanmıştır. Böylece zemin sınıfının analizlere olan etkisi irdelenecektir. Analizler 8.1'deki gibi gerçekleştirilmiştir.

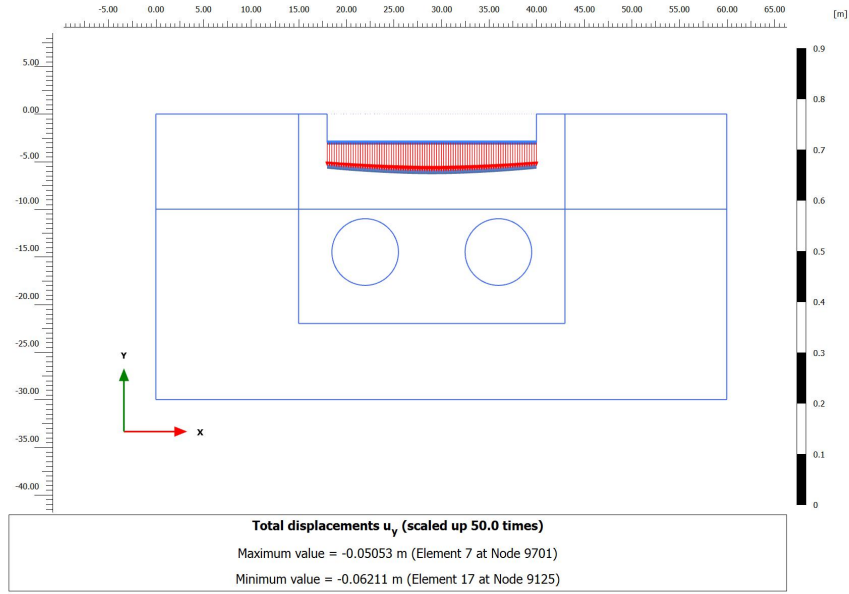


Şekil 8.24 Deforme olmuş sonlu eleman ağı (Durum 3)

Şekil 8.25 ve 8.26'da tünel inşasının ardından sistem ve yapı temelinde oluşan deformasyonlar gösterilmiştir.



Şekil 8.25 Modelde oluşan toplam düşey deformasyon ($u_y=0.06249m$) (Durum 3)



Şekil 8.26 Temelde oluşan toplam düşey deformasyon ($u_y=0.096\text{m}$) (Durum 3)

Yapılan analizin ardından hassaslık analizi gerçekleştirilmiştir. Şekil 8.27’de hassaslık analizi sonucu elde edilen, parametrelerin hassaslık derecesi değerleri gösterilmiştir.

Mevcut durumda bulunan bir yapı altında kazısı yapılan tünelin, temel altında meydana getirdiği oturmaya en çok etki eden değer; tünelin yer aldığı birim olan kilin sekant modülü, kayma direnci açısı ve kohezyon değeridir (Şekil 8.27). Diğer parametrelerdeki değişikliklerin deplasmana olan etkisi ihmal edilebilecek düzeydedir. Hassaslık sayısı yüksek olan bu üç değer seçilerek parametre analizi gerçekleştirilmiştir. Parametre analizi kombinasyonları Şekil 8.10’da gösterilmiştir.

Type	Material	Parameter	Min	Ref	Max	SensiScore
Soil	Kil	γ_{unsat}	14.80	15.00	15.20	0
Soil	Kil	γ_{sat}	18.80	19.00	19.20	6
Soil	Kil	E_{50}^{ref}	20.00E3	25.00E3	30.00E3	25
Soil	Kil	c'_{ref}	10.00	15.00	20.00	30
Soil	Kil	$\phi'(\text{phi})$	25.00	27.00	29.00	24
Soil	Kum	γ_{unsat}	16.80	17.00	17.20	2
Soil	Kum	γ_{sat}	20.80	21.00	21.20	4
Soil	Kum	E_{50}^{ref}	25.00E3	35.00E3	45.00E3	6
Soil	Kum	$\phi'(\text{phi})$	32.00	34.00	35.00	2

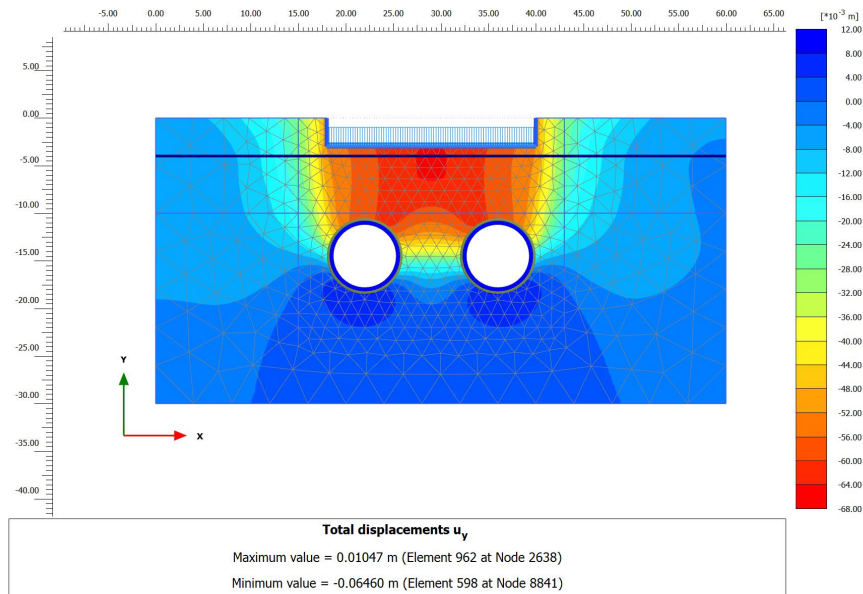
Şekil 8.27 Parametrelerin Hassaslık Derecesi Değerleri

Hassaslık sayısı yüksek olan bu üç değer seçilerek parametre analizi gerçekleştirilmiştir. Parametre analizi kombinasyonları Şekil 8.28’de gösterilmiştir.

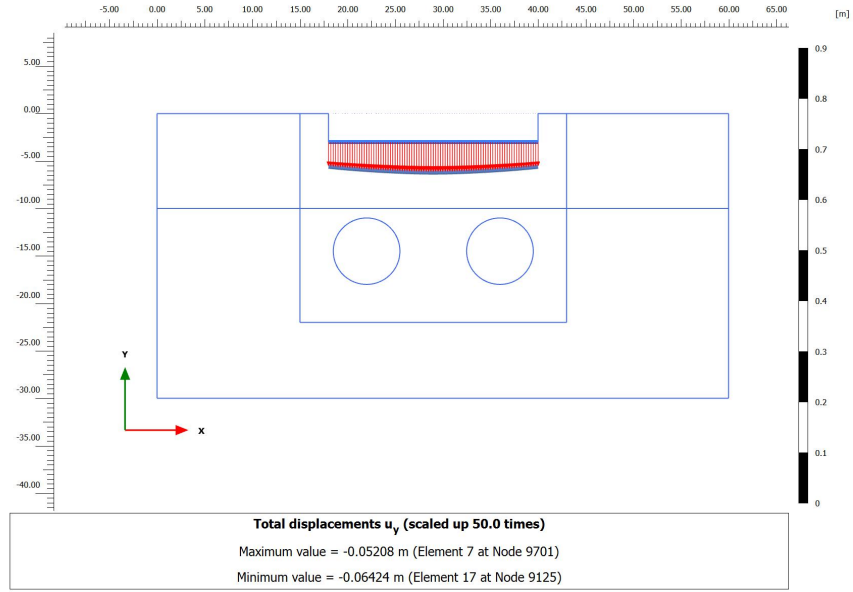
Name	Msg	E_{50}^{ref} [Kil]	c'_{ref} [Kil]	ϕ' (phi) [Kil]
Durum 3_00_00	OK	20.00E3	10.00	25.00
Durum 3_00_01	OK	20.00E3	10.00	29.00
Durum 3_00_02	OK	20.00E3	20.00	25.00
Durum 3_00_03	OK	20.00E3	20.00	29.00
Durum 3_00_04	OK	30.00E3	10.00	25.00
Durum 3_00_05	OK	30.00E3	10.00	29.00
Durum 3_00_06	OK	30.00E3	20.00	25.00
Durum 3_00_07	OK	30.00E3	20.00	29.00

Şekil 8.28 Parametre Analizinde Yapılan Analiz Kombinasyonları

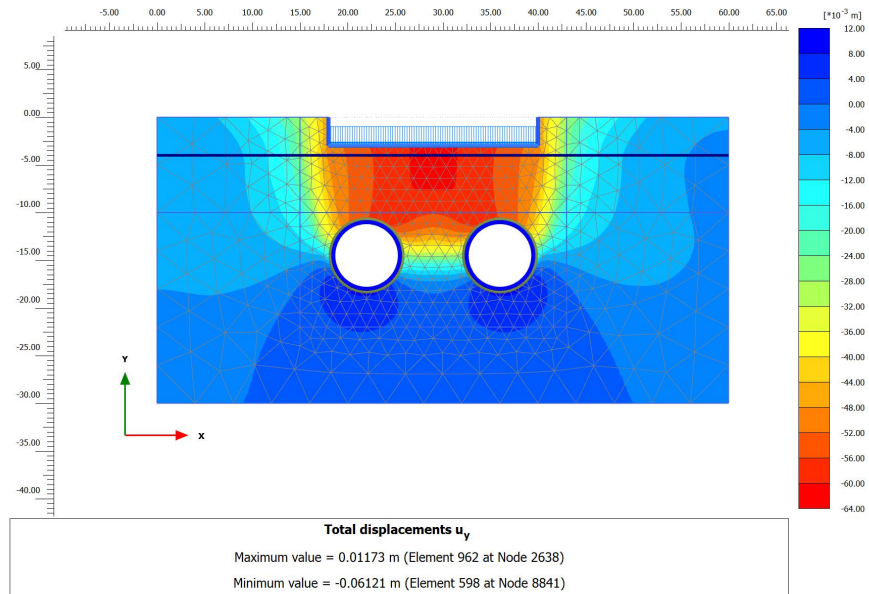
Parametre analizi sonucunda sistemde ve temel altında oluşan maksimum ve minimum deplasman değerleri Şekil 8.29, Şekil 8.30, Şekil 8.31 ve Şekil 8.32’de verilmiştir.



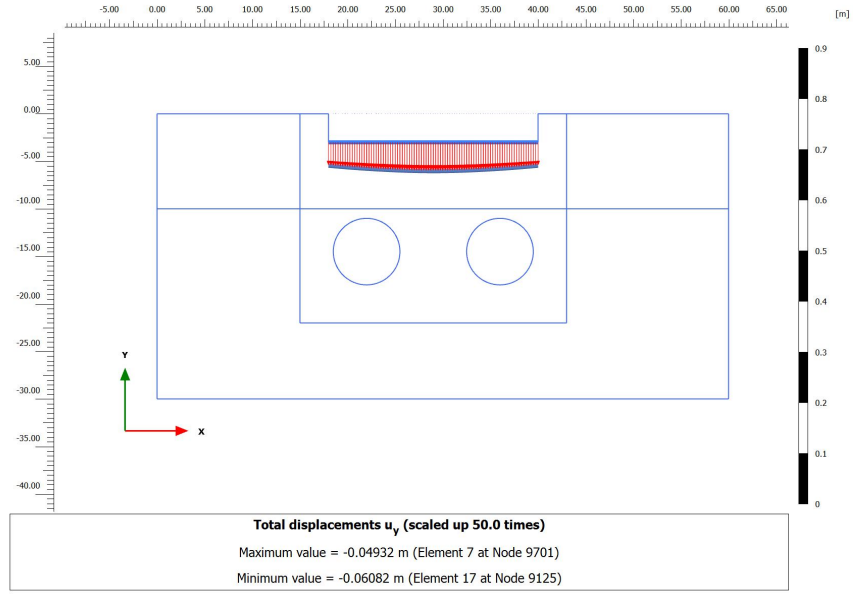
Şekil 8.29 Minimum parametre değerleri ile parametre analizinde elde edilen düşey deplasman değerleri (Durum 3)



Şekil 8.30 Minimum parametre değerleri ile parametre analizinde elde edilen temelde oluşan düşey deplasman değerleri (Durum 3)



Şekil 8.31 Maksimum parametre değerleri ile parametre analizinde elde edilen düşey deplasman değerleri (Durum 3)



Şekil 8.32 Minimum parametre değerleri ile parametre analizinde elde edilen temelde oluşan düşey deplasman değerleri (Durum 3)

Hassaslık analizi ve parametre değişiminin ardından tünel konumu, temel gömme derinliği ve yapı yükünün modele olan etkisinin irdelenmesi için belirtilen öğeler değiştirilerek analizler gerçekleştirilmiştir. Analizler sonucunda yapı temelinde oluşan ek deplasman değerleri Tablo 8.9, Tablo 8.10 ve Tablo 8.11’de yer almaktadır.

Tablo 8.9 Gömme derinliği (D_f)’in değiştirilmesi ile temelde oluşan düşey deplasmanlar (Durum 3)

D_f (m)	Bina inşası ile oluşan temelde oluşan düşey deplasman (m)	Tünel inşası sonrası temelde oluşan ek düşey deplasman (m)
-2	0.043	0.060
-3	0.031	0.058
-4	0.02	0.057

Tablo 8.10 Bina yükü (q)'nün değiştirilmesi ile temelde oluşan düşey deplasmanlar
(Durum 3)

q (kPa)	Bina inşası ile temelde oluşan düşey deplasman (m)	Tünel inşası sonrası temelde oluşan ek düşey deplasman (m)
60	0.010	0.053
90	0.031	0.058
120	0.049	0.063

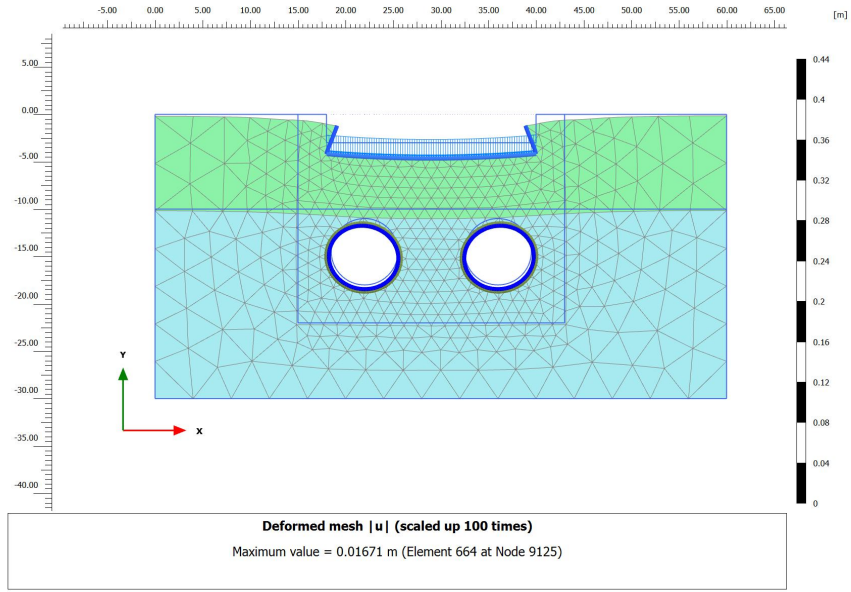
Tablo 8.11 Tünel derinliğinin değiştirilmesi ile temelde oluşan düşey deplasmanlar
(Durum 3)

z (m)	Bina inşası ile temelde oluşan düşey deplasman (m)	Tünel inşası sonrası temelde oluşan ek düşey deplasman (m)
15	0.032	0.052
18	0.032	0.058
21	0.032	0.063
30	0.032	0.073

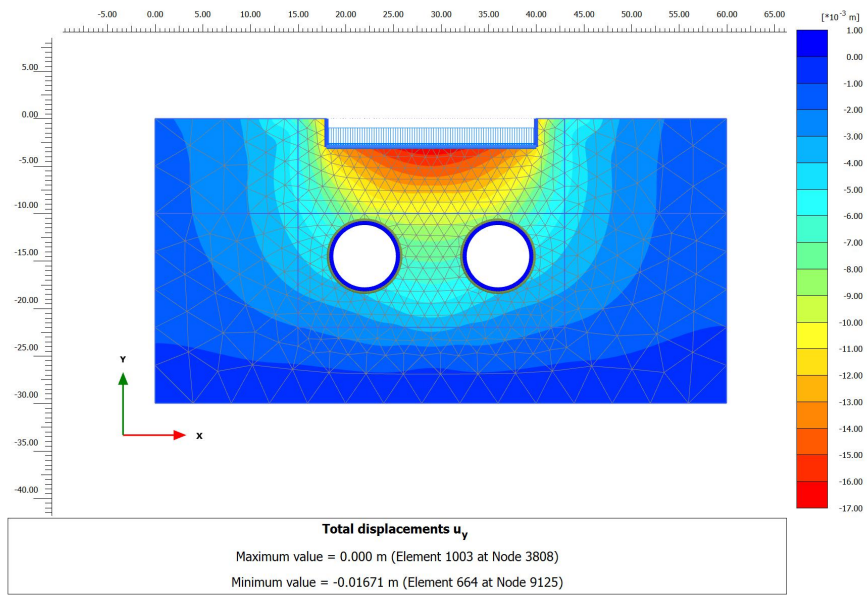
8.4. Durum 4-Önce Bina Sonra Tünellerin İnşa Edildiği Durum-Tünel Kumda

Durum 4'te zemin tabakalarının yeri değiştirilmiştir. Modellemesi yapılacak olan kesitin zemin profili yüzeyden 10m derinliğe kadar kum, devamı kil olarak tanımlanmıştır. Böylece zemin sınıfının analizlere olan etkisi irdelenecektir. Analizler Bölüm 8.2'deki gibi gerçekleştirilmiştir. Şekil 8.33'de deforme olmuş

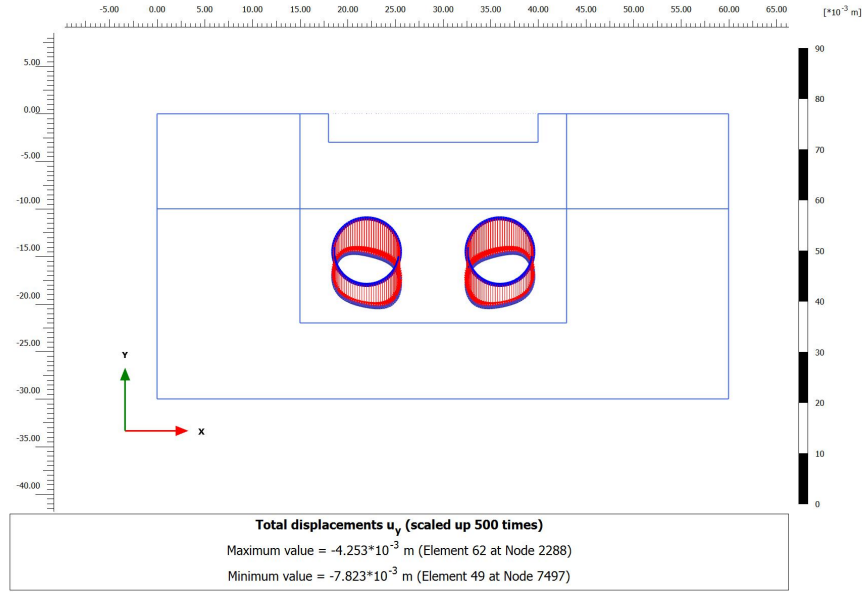
sonlu eleman ağı, Şekil 8.34 ve 8.35’de tünel inşasının ardından sistem ve yapı temelinde oluşan deformasyonlar gösterilmiştir.



Şekil 8.33 Deforme olmuş sonlu eleman ağı (Durum 4)



Şekil 8.34 Modelde oluşan toplam düşey deformasyon ($u_y=0.016m$) (Durum 4)



Şekil 8.35 Tünelde oluşan toplam düşey deformasyon ($u_y=0.0078\text{m}$) (Durum 4)

Yapılan analizin ardından hassaslık analizi gerçekleştirilmiştir. Şekil 8.36'da hassaslık analizi sonucu elde edilen, parametrelerin hassaslık derecesi değerleri gösterilmiştir.

Type	Material	Parameter	Min	Ref	Max	SensiScore
Soil	Kil	γ_{unsat}	14.80	15.00	15.20	0
Soil	Kil	γ_{sat}	18.80	19.00	19.20	4
Soil	Kil	E_{50}^{ref}	20.00E3	25.00E3	30.00E3	21
Soil	Kil	c'_{ref}	10.00	15.00	20.00	8
Soil	Kil	$\varphi'(\text{phi})$	25.00	27.00	29.00	39
Soil	Kum	γ_{unsat}	16.80	17.00	17.20	17
Soil	Kum	γ_{sat}	20.80	21.00	21.20	3
Soil	Kum	E_{50}^{ref}	25.00E3	35.00E3	45.00E3	5
Soil	Kum	$\varphi'(\text{phi})$	32.00	34.00	35.00	3

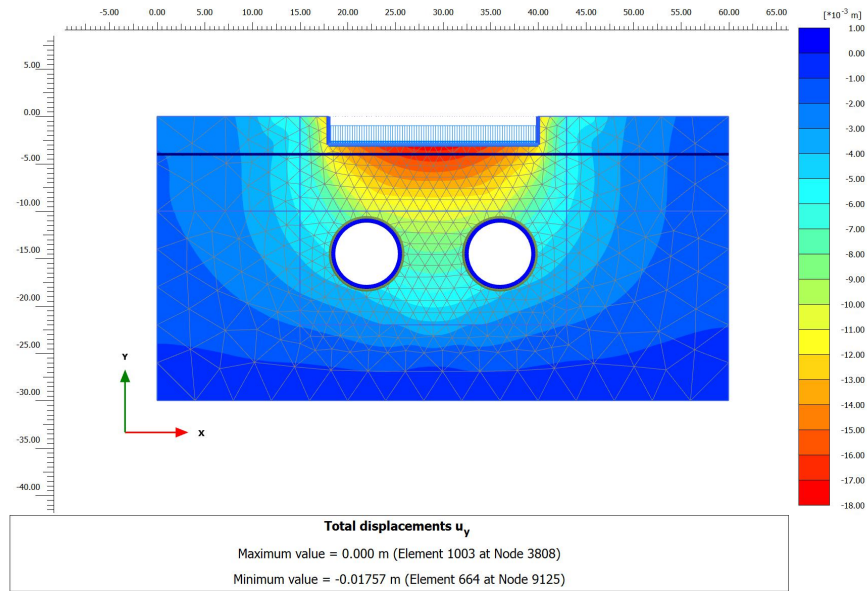
Şekil 8.36 Parametrelerin Hassaslık Derecesi Değerleri

Mevcut durumda bulunan bir yapı altında kazısı yapılan tünelin, temel altında meydana getirdiği oturmaya en çok etki eden değer tünelin yer aldığı kil birimin sekant modülü, kayma direnci açısı ve temel in yer aldığı kum tabakasının birim hacim ağırlığı değeridir. Bu üç değer seçilerek parametre analizi gerçekleştirilmiştir Parametre analizi kombinasyonları Şekil 8.37'de gösterilmiştir.

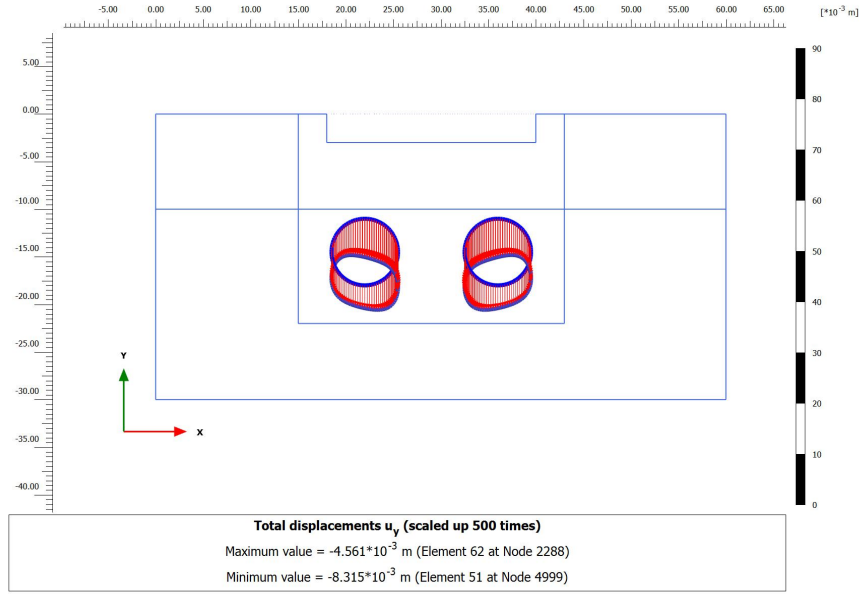
Name	E_{50}^{ref} [kN]	φ' (phi) [kN]	V_{unsat} [Kum]
Durum 4_00	20.00E3	25.00	16.80
Durum 4_01	20.00E3	25.00	17.20
Durum 4_02	20.00E3	29.00	16.80
Durum 4_03	20.00E3	29.00	17.20
Durum 4_04	30.00E3	25.00	16.80
Durum 4_05	30.00E3	25.00	17.20
Durum 4_06	30.00E3	29.00	16.80
Durum 4_07	30.00E3	29.00	17.20

Şekil 8.37 Parametre Analizinde Yapılan Analiz Kombinasyonları

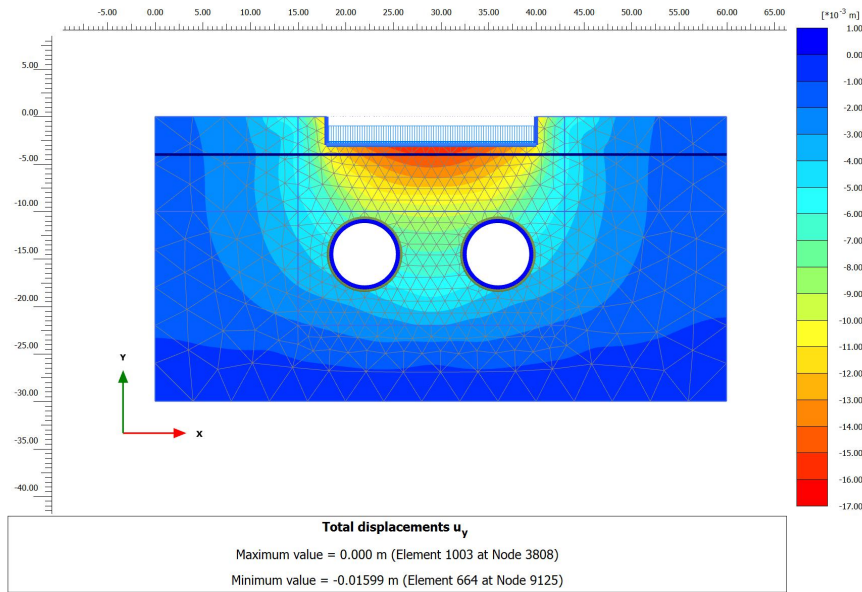
Parametre analizi sonucunda sistemde ve temel altında oluşan maksimum ve minimum deplasman değerleri Şekil 8.38, Şekil 8.39, Şekil 8.40 ve Şekil 8.41'de verilmiştir.



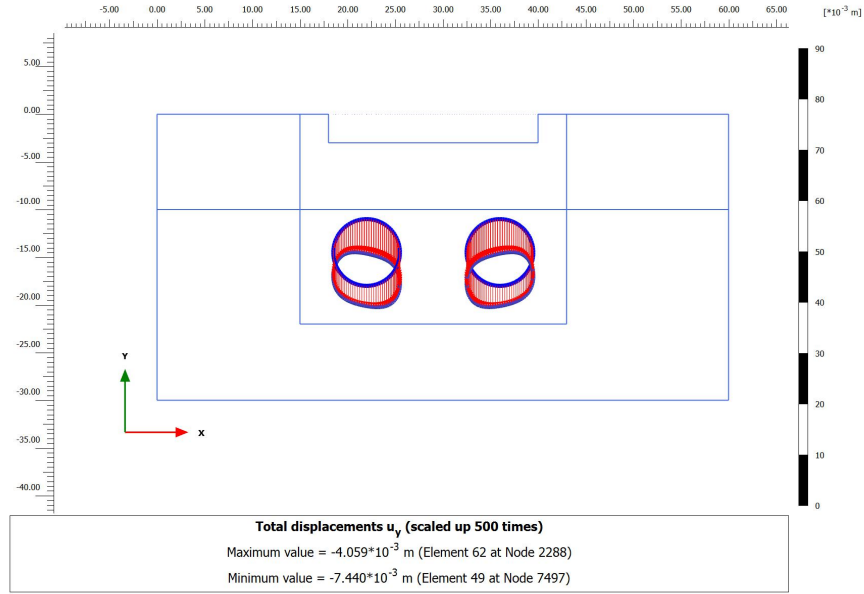
Şekil 8.38 Parametre analizinde kullanılan minimum parametre değerleri ile elde edilen düşey deplasman değerleri (Durum 4)



Şekil 8.39 Parametre analizinde kullanılan minimum parametre değerleri ile elde edilen tünel kaplamasında oluşan düşey deplasman değerleri (Durum 4)



Şekil 8.40 Parametre analizinde kullanılan maksimum parametre değerleri ile elde edilen düşey deplasman değerleri (Durum 4)



Şekil 8.41 Parametre analizinde kullanılan maksimum parametre değerleri ile elde edilen tünel kaplamasında oluşan düşey deplasman değerleri (Durum 4)

Hassaslık analizi ve parametre değişiminin ardından tünel konumu, temel gömme derinliği ve yapı yükünün modele olan etkisinin irdelenmesi için belirtilen ögeler değiştirilerek analizler gerçekleştirilmiştir. Analizler sonucunda tünel kaplamasında oluşan ek deplasman değerleri Tablo 8.12, Tablo 8.13 ve Tablo 8.14’te yer almaktadır.

Tablo 8.12 Gömme derinliği (D_f)’nin değiştirilmesi ile tünel kaplamasında oluşan düşey deplasmanlar (Durum 4)

D_f (m)	Tünel inşası ile oluşan tünel kaplamasında oluşan düşey deplasman (m)	Bina inşası sonrası tünel kaplamasında ek düşey deplasman (m)
-2	0.053	0.011
-3	0.053	0.0071
-4	0.053	0.0058

Tablo 8.13 Bina yükünün (q) değiştirilmesi ile tünel kaplamasında oluşan düşey deplasmanlar (Durum 4)

q (kPa)	Tünel inşası ile tünel kaplamasında oluşan düşey deplasman (m)	Bina inşası sonrası tünel kaplamasında oluşan ek düşey deplasman (m)
60	0.053	0.0035
90	0.053	0.0071
120	0.053	0.0135

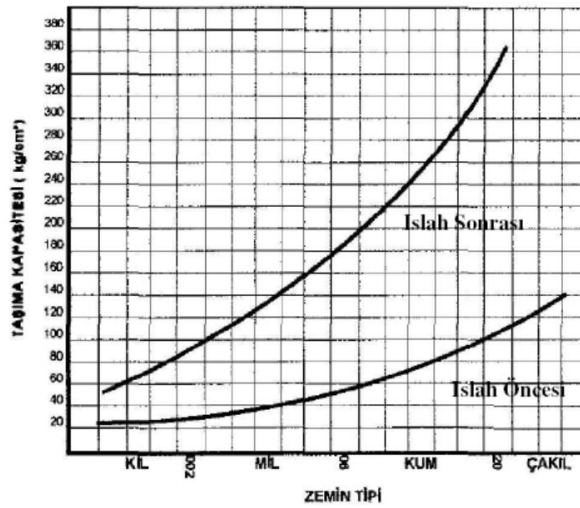
Tablo 8.14 Tünel derinliğinin değiştirilmesi ile tünel kaplamasında oluşan düşey deplasmanlar (Durum 4)

z (m)	Tünel inşası ile oluşan tünel kaplamasında oluşan düşey deplasman (m)	Bina inşası sonrası tünel kaplamasında oluşan ek düşey deplasman (m)
15	0.060	0.009
18	0.053	0.0071
21	0.069	0.053
30	0.072	0.006

9. YÜKSEK MODÜLLÜ KOLONLAR- JET GROUT YÖNTEMİ

Bölüm 8’de anlatılan Durum-1 ve Durum-3 analizlerinden elde edilen deplasman değerleri, bina hasar sınıflandırmasına göre (Tablo 4.1) “yüksek hasar” sınıfında kalmaktadır. Bu nedenle bina imalatı öncesinde temel altı zemin iyileştirme yöntemi yapılmış olunan durumda modelde oluşacak olan deplasmanlar irdelenmiştir. Analizlerden en fazla ek deplasmanı veren Durum-1 ($q=120$ kPa)’de *jet grout* yöntemi ile tünel seviyesine kadar 60cm çapında 2.00mx2.0m karelaj ile iyileştirme yapılmıştır.

Yüksek modüllü kolonlar, zeminin delgi makinesi ile delinmesinin ardından, yüksek basınç ile (yaklaşık 400-500 bar) çimento-su karışımının enjekte edilmesiyle oluşturulur. Bu enjeksiyon sırasında zemin yerinde parçalanarak takım yukarı çekilir. Böylece kolonlar imal edilir. Bu yöneme “*jet grout*” yöntemi denmektedir [19].



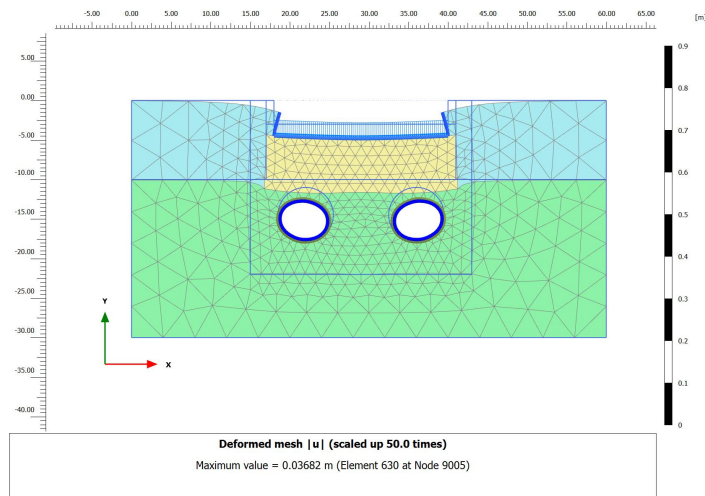
Şekil 9.1 Jet grout yöntemi ile iyileştirme sonrası zemin taşıma kapasitesindeki değişim (Melegary-Garasino, 1991)

Şekil 9-1’de jet grout yöntemi ile yapılan iyileştirmenin ardından zeminin temel taşıma kapasitesinde %100’den fazla bir artış olduğu görülmektedir. Bu nedenle aşağıdaki analizlerde iyileştirme sonrası zemin parametreleri yaklaşık %50 oranında arttırılmıştır. Analizde kullanılan zemin parametre değerleri Tablo 9.1’de verilmiştir.

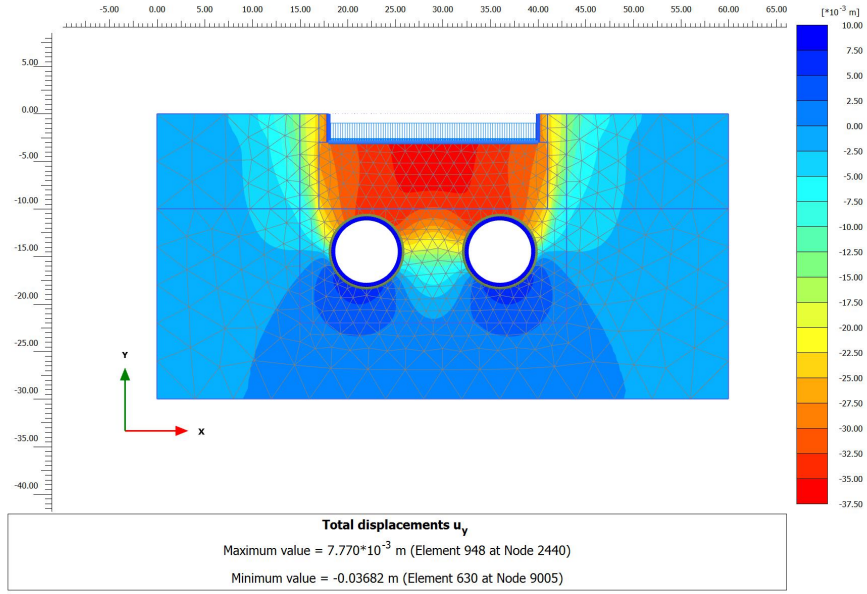
Tablo 9.1 Referans Zemin Parametreleri Değerleri

Parametre	Sembol	Jet Grout-Kil	Birim
Malzeme Modeli	-	Pekleşen Zemin Modeli	-
Davranış Tipi	-	Drenajlı	-
Kuru Birim Hacim Ağırlığı	ρ_{kuru}	19	kN/m ³
Yaş Birim Hacim Ağırlığı	$\rho_{yaş}$	21	kN/m ³
Kiriş(sekant) Modülü	E_{50}^{ref}	50000	kN/m ²
Kohezyon	c'_{ref}	50	kN/m ²
Kayma Direnci Açısı	ϕ'_{ref}	29	°

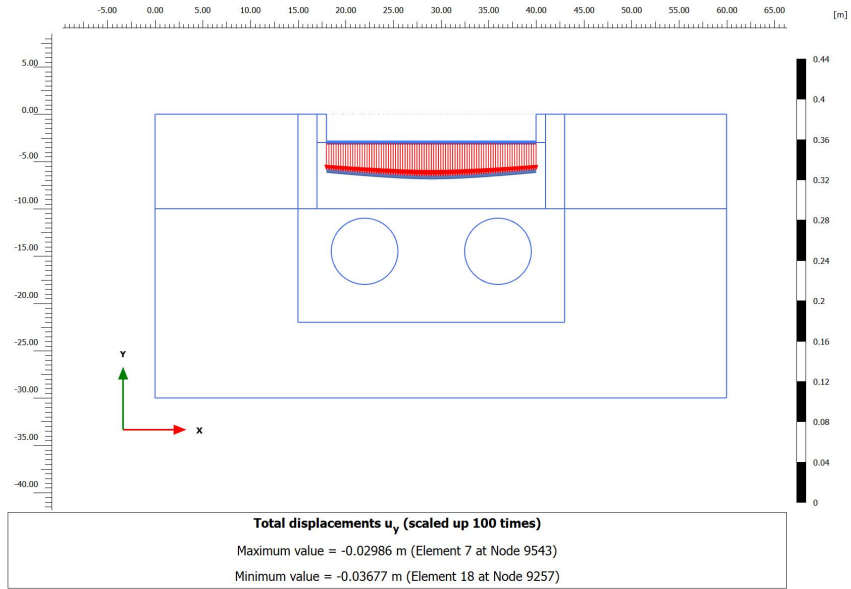
Şekil 9.3 ve 9.4’da bina temeli altında jet grout yöntemi ile iyileştirme yapılmış olan temelde, tünel inşasının ardından sistem ve yapı temelinde oluşan deformasyonlar gösterilmiştir. Elde edilen deplasman değerleri “orta hasar” seviyesinde kalmaktadır.



Şekil 9.2 Deforme olmuş sonlu eleman ağı (Jet-Grout ile iyileştirilmiş zemin)



Şekil 9.3 Modelde oluşan toplam düşey deformasyon ($u_y=0.036m$) (Jet-Grout ile iyileştirilmiş zemin)



Şekil 9.4 Temelde oluşan toplam düşey deformasyon ($u_y=0.03677m$) (Jet-Grout ile iyileştirilmiş zemin)

10. ANALİZ SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Çalışmada yapılmış olan hassaslık analizi sonuçlarına göre mevcut bina altında kum birim içerisinde açılan tünel yapısının, bina temelinde meydana getirdiği ek deplasmanlara en fazla etki eden zemin parametresi tünelin yer aldığı kum birimin sekant modülüdür. Bu zemin parametresinin hassaslık sayısı %44'tür. Temelde oluşan ek deplasmanlara en fazla etki eden ikinci parametre ise kum birimin kayma direnci açısı olup, hassaslık sayısı %25'tir (Durum-1). Mevcut bina altında kil birim içerisinde açılan tünel yapısının, bina temelinde meydana getirdiği ek deplasmanlara en fazla etki eden zemin parametresi ise, kil birimin kohezyonu olmaktadır. Bu zemin parametresinin hassaslık sayısı ise %30'dur. Temelde oluşan ek deplasmanlara en fazla etki eden %25 hassaslık sayısı ile kil birimin sekant modülü, %24 hassaslık sayısı ile kayma direnci olmaktadır (Durum-3).

Mevcut durumda bulunan tünel yapısı üzerine inşa edilen bina nedeniyle tünelin üst noktasında meydana gelen ek deplasmanlara etki eden zemin parametresi, tünelin yer aldığı kum birimin sekant modülü ve kayma direnci açısıdır. Her iki parametrenin de hassaslık sayısı %33'dür(Durum-2). Kil birim içerisinde yer alan bir tünel üzerinde inşa edilen binanın, tünelin üst noktasında meydana getirdiği ek deplasmanlara etki eden zemin parametresi ise kil birimin kayma direnci açısı değeridir. Bu zemin parametresinin hassaslık sayısı %39'dur. Bu durumda tünelin üst noktasında oluşan ek deplasmanlara en fazla etki eden ikinci zemin parametresi ise kil birimin sekant modülüdür. Bu zemin parametresinin hassaslık sayısı ise % 21'dir (Durum-4).

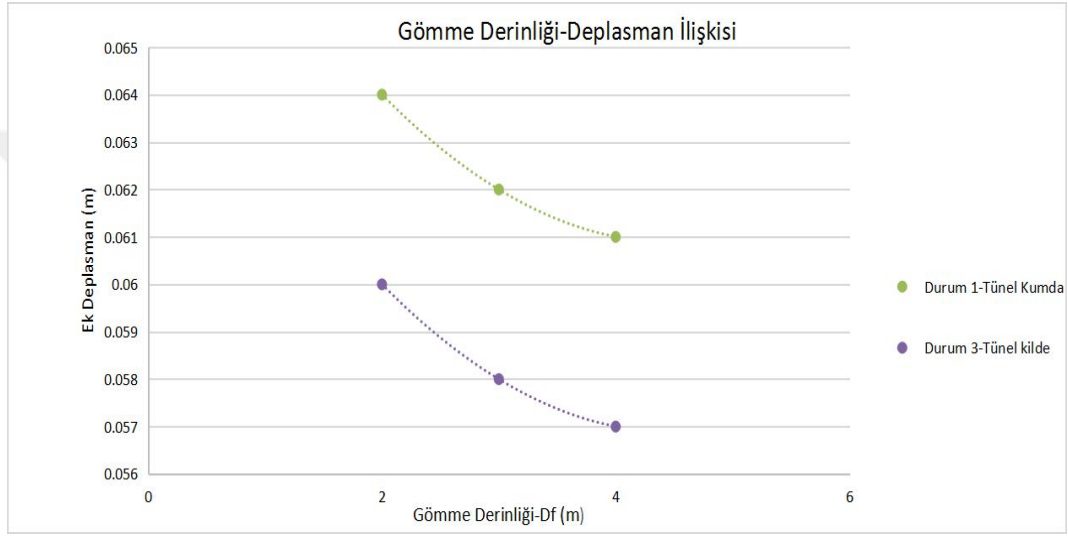
Zemin parametresinin yanı sıra öge rijitliklerinin bina temelinde ve tünel kaplamasına olan etkisi irdelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre gömme derinliğinin ek deplasmanlara olan etkisi Şekil 10.1 ve 10.2'de verilmiştir.

Mevcut bina altında açılan tünel nedeniyle (Durum 1 ve 3), temelin orta noktasında oluşan ek deplasmanlara temel gömme derinliğinin etkisi (Şekil 10.1);

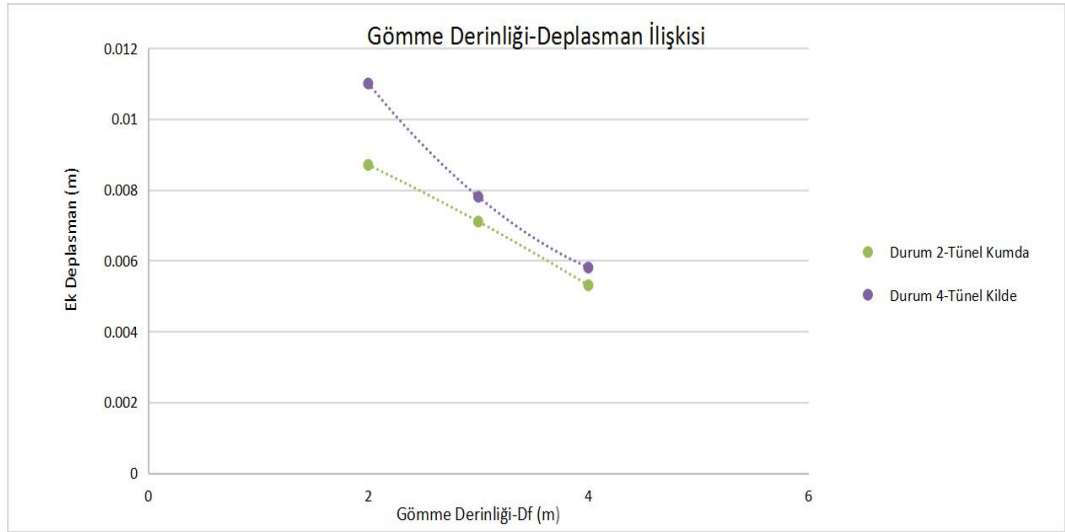
- Gömme derinliği artarken, ek deplasmanlar azalmaktadır,
- Tünel imalatının kum birim içerisinde gerçekleşmesi, kil birime göre daha fazla ek deplasman yapmasına neden olmaktadır.

Mevcut tünel üzerinde inşa edilen bina temeli gömme derinliğinin, tünelin üst noktasında meydana getirdiği ek deplasmanlara olan etkisi (Şekil 10.2);

- Gömme derinliği artarken, ek deplasmanlar azalmaktadır. Ek deplasmanlar azalma eğilimindedir,
- Gömme derinliğindeki 2m'lik bir artış, temel kum birim üzerinde ise tünelin üst noktasında meydana gelen deplasmanlarda %61'lik bir azalma , temel kil birim üzerinde ise %53'lük bir azalma sağlamıştır.



Şekil 10.1 Gömme derinliğinin etkisi (Durum 1 ve Durum 3)



Şekil 10.2 Gömme derinliğinin etkisi (Durum 2 ve Durum 4)

Elde edilen sonuçlara göre bina yükünün ek deplasmanlara olan etkisi Şekil 10.3 ve Şekil 10.4'te verilmiştir. Mevcut bina altında açılan tünel nedeniyle (Durum 1 ve 3), temelin orta noktasında oluşan ek deplasmanlara bina yükünün etkisi (Şekil 10.3);

- Analizlerde bina yükündeki değişim, mevcut yapı altında imal edilen tünel üzerinde oluşan ek deplasmanlara doğrusal olarak etki etmektedir.
- Mevcut bina yükündeki artış, eğer tünel kum birim içerisinde yer alıyorsa kil birimde yer almasına göre daha fazla ek deplasmanlara neden olmaktadır.

Mevcut tünel üzerinde inşa edilen bina yükünün tünelin üst noktasında meydana getirdiği ek deplasmanlara olan etkisi (Şekil 10.4);

- Mevcut tünel yapısı üzerinde imal edilen bina yükü artarken, tünel üzerinde meydana getirdiği ek deplasmanlar görece daha fazla artmaktadır. Bina yükü ile ek deplasmanlar arasında doğru orantılı bir ilişki vardır.
- Bina yükü nedeniyle meydana gelen deplasmanlar, mevcut tünelin kil veya kum birim içerisinde yer almasından etkilenmemektedir. Modelde oluşan ek deplasmanların neredeyse eşit olduğu gözlenmiştir.



Şekil 10.3 Bina yükünün etkisi (Durum 1 ve Durum 3)



Şekil 10.4 Bina yükünün etkisi (Durum 2 ve Durum 4)

Elde edilen sonuçlara göre örtü yükünün ek deplasmanlara olan etkisi Şekil 10.5 ve Şekil 10.6'da verilmiştir.

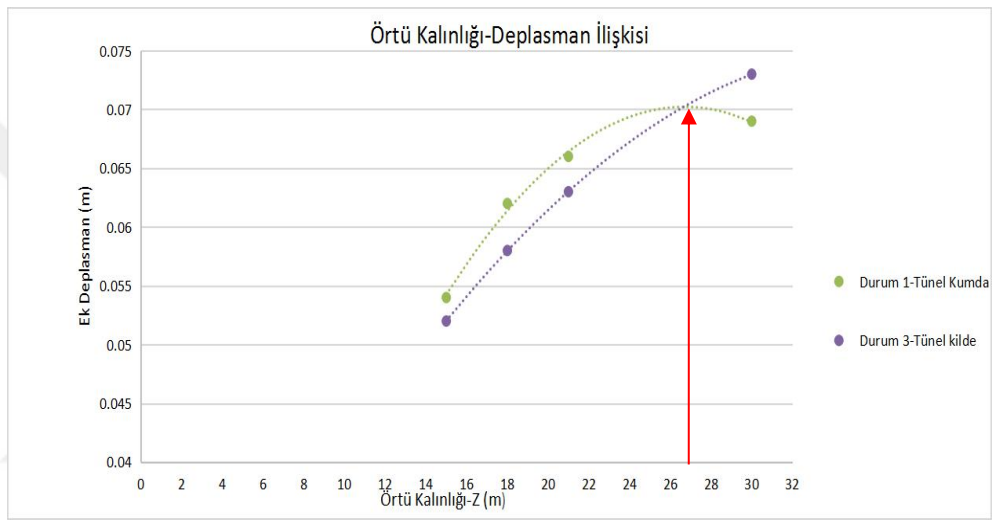
Mevcut bina altında açılan tünel nedeniyle (Durum 1 ve 3), temelin orta noktasında oluşan ek deplasmanlara örtü yükünün etkisi (Şekil 10.5);

- $z < 27\text{m}$ için tünel derinliği artarken ek deplasmanlar artmaktadır.
- Tünel derinliği $z > 27\text{m}$ olduğunda mevcut bina altına imal edilmiş olan tünel nedeniyle kil birimde yer alan temelde oluşan ek deplasmanlar artmaya

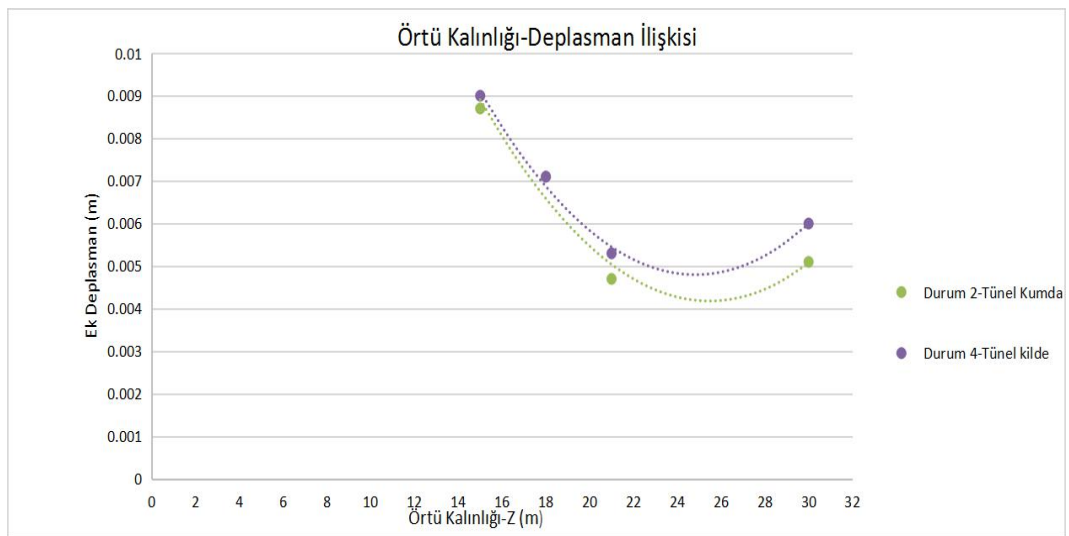
devam ederken, kum birimde yer alan temelde oluşan ek deplasmanlar azalmıştır.

Mevcut tünel üzerinde inşa edilen binanın tünelin üst noktasında meydana getirdiği ek deplasmanlara örtü yükünün etkisi (Şekil 10.6);

- Tünel derinliği $z=27\text{m}$ olana kadar azalarak azalırken, $z>27\text{m}$ olduğunda deplasmanlar artmaya başlamaktadır.
- Tünel kil birimde ise deplasmanlar görece fazla olmaktadır.



Şekil 10.5 Örtü kalınlığının etkisi (Durum 1 ve Durum 3)



Şekil 10.6 Örtü kalınlığının etkisi (Durum 2 ve Durum 4)

11. SONUÇLAR

Bu çalışmada, metro tüneli-temel-zemin etkileşiminde model geometrisi özellikleri ve zemin parametrelerinin deplasmanlara olan etkisi iki boyutlu sayısal analizler yardımıyla irdelenmiştir. Yapılan analizlerden elde edilen sonuçlara göre;

1. Hassaslık analizi ile zemin parametrelerinin belirli bir noktaya olan etkisi tespit edilebilmektedir. Etkisi yüksek olan zemin parametreleri ile parametre analizi yapıp, daha az sayıda kombinasyon ile analizler gerçekleştirilebilmiştir. Böylece analiz aşamasında zamandan tasarruf edilmiştir.
2. Hassaslık analizinde kullanılan zemin parametrelerinin alabileceği değer aralığının seçimi, gerçeğe en yakın değer bulunmasında büyük önem taşımaktadır. Doğru aralığın seçimi parametre analizi yapıldığında gerçeğe en yakın sonuçların elde edilmesini sağlayacaktır.
3. Yapılan hassaslık analizi sonucuna, mevcut bina altında açılan tünel yapısı nedeniyle, bina temelinde oluşan ek deformasyonlara etki eden parametreler tünel yapısının yer aldığı zeminin kohezyon değeridir.
4. Temel gömme derinliği analizlerde birer metre arttırılırken, ek deplasmanlar her analizde giderek azalmıştır. Böylece gömme derinliği ile ek deplasman arasında negatif bir ilişki olduğu bulunmuştur.
5. Mevcut tünel yapısı üzerine inşa edilecek olan temelin gömme derinliğinin değişimi ile elde edilen deplasmanlar temel kum birimde ise, kil birimden %8 daha fazla ek deplasman olduğu gözlenmiştir.
6. Mevcut bina yükü ile imal edilecek olan tünel kaplamasında oluşan ek deplasmanlar arasındaki ilişki doğrusaldır.
7. Mevcut tünel yapısı üzerinde imal edilecek olan temele etki eden yük nedeniyle tünelde oluşan deplasmanlar bina yükü ile artmıştır. Bu durumda tünelin içerisinde bulunduğu birimin özellikleri göz ardı edilebilecek düzeyde değişikliğe neden olmaktadır.

8. Farklı örtü kalınlıkları altında tünel veya temel yapısında oluşan deplasmanlar kil birimde, kum birime göre daha fazla deplasmana neden olmaktadır.



12. KAYNAKÇA

1. Peck, B. "Deep excavations and tunneling in soft ground." Proceedings of 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Mexico city, 1969: 225-290.
2. Gerçek, H., Geniş, M. "Çevre kaya kütlelerinin mekanik özelliklerinin derin yeraltı açıklıklarının sismik duraylılığına etkisi". VI. Bölgesel Kaya Mekaniği Sempozyumu, 2002.
3. Verruijt, A., Booker, J. R. "Surface settlement due to deformation of a tunnel in an elastic half plane", Geotechnique 46, No. 4, 1996:753-756.
4. Zhou, Bo., Marshall, A. M., Yu, H., "The effect of relative density on settlement above tunnels in sand", Tunnelling and Underground Construction, 2014, ASCE
5. Salimi, A.R., Esmaili M., Salehi, B. "Analysis of TBM tunnelling effect on surface subsidence: A case study from Tehran, Iran", International journal of environmental, chemical, ecological, geological, and geophysical engineering, 2013, Vol:7, No:6.
6. Sert, S., Önalp, A., Arel, E., "Sayısal Çözümlerde Zemin Özelliklerindeki Değişimin Sonuçlara Etkisi" ZMTM 13. Ulusal Kongresi İKÜ, İstanbul, 2010:471-482.
7. <http://www.istanbulunmetrosu.com/Haritalar/>
8. Mori, H., Nomoto, T., Matsumoto, M., (1995), "Overview on Ground Movements During the Shield Tunnelling-A Survey on Japanese Shield Tunnelling", Underground Construction in Soft Ground, Fujitsa & Kusabeeke (eds), Balkema
9. Ayaydın, N. "Tünel Açma Yöntemlerinin Karşılaştırılması" Türkiye İnşaat Mühendisliği 9. Teknik Kongresi, 1987,405-422.
10. Rabcewicz, L. "The New Austrian Tunneling Method" Water Power, 1964, 453-457.
11. Schmidt, B. "Settlements and ground movements associated with tunneling in soil.", Ph.D. Thesis, University of Illinois, 1969.
12. <http://www.stfa.com/tr/tunel-acma-makinesinin-tbm-ilk-kez-kullanimi/>
13. Arıoğlu, B., Yuksel, A. ve Arıoğlu, E. "İstanbul-Mevhibe İnönü Tünelinde tasman (yüzey oturması) eğrisi dönüm noktasının belirlenmesi" IV. Kaya Mühendisliği Sempozyumu, İstanbul, 2002.
14. Peck, B. "Deep excavations and tunneling in soft ground." Proceedings of 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Mexico city, 1969: 225-290.

15. Verruijt, A., Booker, J. R. "Surface settlement due to deformation of a tunnel in an elastic half plane", *Geotechnique* 46, No. 4, 1996:753-756.
16. Attewell, P.B., Yeates, J. & Selby, A.R. "Soil movement induced by tunnelling and their effects on pipelines and structures." New York: Chapman and Hall, 1986.
17. Berilgen, M. "Geoteknik Mühendisliğinde Sonlu Elemanlar Yöntemi", Plaxis Kursu, Geogrup İnşaat A.Ş. , İstanbul, 2015.
18. Brinkgreve, R.B.J., Engin, E., ve Swolfs, W.M. (ed), *Plaxis Manual*, Plaxis BV., Hollanda, 2017.
19. Durgunoğlu, T. "Yüksek modüllü kolonların temel mühendisliğinde kullanımı" *TMH*, sayı 431, 2004, 39-52.
20. Peschl, G. M. "Reliability Analyses in Geotechnics with the Random Set Finite element method". Dissertation, Institute for Soil Mechanics and Foundation Engineering, Graz University of Technology, 2004.
21. O'Reilly, P. and New, M. "Settlement above tunnels in the United Kingdom - their magnitude and prediction." *Proceedings of Tunneling Symposium 1982*, 173-181.
22. Herzog, M. "Die Setzungsmulde über seicht liegenden Tunneln" Berlin, 1985, 375-377.
23. Çınar, M., Feridunoğlu, C. "Tünel açma makineleri" *Madencilik Dergisi*, 1998.
24. Ercelebi, S.G., Bilgin, N., Copur, H., Feridunoglu, "Surface Settlement Prediction For İstanbul Metro Tunnels via 3D FE an Empirical Methods", C., *Underground Space Use: Analysis of the Past And Lessons For the Future*, Taylor&Francis Group, London, ISBN 04 1537 452 9.
25. M. Karaksus & R.J. Fowell, "An insight into the New Austrian Tunnelling Method (NATM)", *The 7th Regional Rock Mechanics Symposium*, Sivas, 2004.
26. Melegary C., Garassino, A.I, "Seminar On Jet Grouting" Singapore, 1997.
27. Whittle, A.J. and Sagaseta, C. "Analysing the effects of gaining ad losing ground" *Soil behavior soft ground construction*, J. T. Germain, Vol. 119, ASCE, 2003, 255-291.